

Université de Sherbrooke
Faculté des sciences appliquées
Département de génie civil

**Impact du changement d'échelle, des carbonates et du chrome
sur la décontamination des sols par électrocinétique**

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées
Spécialité: génie civil

Charles Beauregard

À Yvon,

Résumé

Des études déjà réalisées au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke ont démontré que des sols contaminés en laboratoire peuvent être décontaminés adéquatement par électrocinétique. Cette technique consiste à appliquer, à l'aide d'électrodes, une différence de potentiel électrique à un sol pour y extraire les métaux lourds. On voit un avantage dans l'exploitation du potentiel électrique en ce qu'il permet de traiter aussi facilement un sol fin qu'un sol grossier. De plus, la décontamination par électrocinétique peut se faire avec des sols ayant de faibles teneurs en eau.

Les trois objectifs spécifiques de cette étude sont de décrire l'effet du changement d'échelle, des carbonates et du chrome sur la décontamination des sols par électrocinétique. Un objectif plus général est de décrire la migration des métaux lourds au cours d'un traitement. Pour atteindre ces objectifs, douze essais de décontamination par électrocinétique ont été effectués en cellule de 1 litre, et un essai a été effectué en cellule de 100 litres. Deux sols de source industrielle et deux sols contaminés en laboratoire ont été testés. Ces sols étaient principalement contaminés par du chrome, du zinc, du plomb, du cuivre, ou une combinaison de ces métaux lourds.

Le changement d'échelle produit un effet important sur la consommation d'énergie car il a été démontré que l'énergie consommée par unité de volume est proportionnelle à la distance entre les électrodes. Que ce soit en usine ou *in-situ*, l'espacement entre les électrodes devrait donc être réduit le plus possible lors d'un traitement par électrocinétique. Les expériences menées jusqu'à maintenant indiquent que l'énergie requise pour le traitement électrocinétique augmente avec la teneur en carbonates. À l'avenir, des efforts devraient ainsi être faits pour réduire la consommation d'énergie associée à la décontamination des sols riches en carbonates. Malgré sa nature trivalente ou hexavalente, le chrome s'est comporté de façon semblable au plomb au cours de traitements par électrocinétique. Quant à l'objectif plus général, les observations expérimentales faites au cours de cette étude ont permis de décrire la migration des métaux lourds et des autres ions impliqués dans un traitement par électrocinétique.

Abstract

Studies already made by the Civil Engineering Department at the University of Sherbrooke have shown that soils spiked with heavy metals can be adequately decontaminated by electrokinetics. The essence of this technique is to apply, using electrodes, a direct-current electric field to a soil in order to remove heavy metals. Applying an electric field has the advantage of allowing the treatment of fine grained soils as well as coarse grained soils. Moreover, soils low in water content can also be decontaminated by electrokinetic remediation.

This study has three specific goals: to describe the effects of scale, carbonates and chromium on electrokinetic soil processing. A more general goal is to describe the migration of heavy metals while the soil is being processed. To reach these goals, twelve tests were made using a one liter apparatus, and one test was made using a 100 liter apparatus. Two industrial soils and two spiked soils were tested. The soils were mainly contaminated by chromium, zinc, lead, copper, or a combination of these heavy metals.

The change in scale has a significant impact on energy consumption. In fact, it has been shown that the energy density required is proportional to the distance between electrodes. Whether in a soil processing plant or *in situ*, the space between electrodes should be reduced as much as possible. Soils containing a high amount of carbonates can be decontaminated by electrokinetics and it seems that the energy required increases with the carbonate content. In the future, efforts should be made to reduce the energy consumption associated with the remediation of this type of soil. With regard to electrokinetic soil processing, it seems that chromium behaves like lead, and possibly like other heavy metals. Experimental observations throughout this study allow to describe, in a general manner, the migration of heavy metals and other ionic species involved in electrokinetic soil processing.

Remerciements

Je suis très reconnaissant envers M. Guy Lefebvre, mon directeur de recherche, pour l'encadrement et le support financier qu'il m'a fournis. Sa passion pour la géotechnique, la qualité de son enseignement, ainsi que sa compétence m'ont motivé constamment.

Cette étude aurait été impossible sans l'apport de M. Jean-Guy Lemelin qui a construit les cellules de décontamination (dont la cellule de 100 litres), et de M. Éric Drouin pour son aide technique, notamment lors de l'échantillonnage du sol utilisé pour l'essai en cellule de 100 litres. L'aide de M. Serge Bérubé et de Mme Carole Baril pour les analyses chimiques, et de M. Pierre Magny pour les analyses au microscope électronique fut aussi très appréciée. J'ai toujours eu du plaisir à travailler avec ces gens.

J'aimerais aussi remercier MM. Trimbak V. Pavate et Alexandre Cabral. Le premier pour sa disponibilité et l'accès à sa bibliographie, le deuxième pour son dynamisme et pour m'avoir permis de participer à un colloque sur la gestion des déchets.

Durant ces deux années, j'ai reçu de l'aide et j'ai eu beaucoup de plaisir avec mes confrères Nicolas, Benoît, Jean-François, Franck, Gilles, Éric, Moni, David, Fabienne, Abderhamane et Gérald. J'espère avoir l'occasion de m'amuser et collaborer avec eux prochainement.

Finalement, un gros merci et beaucoup d'amour à ma famille, mes amis, et ma conjointe Marie-Hélène qui s'est intéressée à mon projet et m'a si bien encouragé.

Table des matières

1	Introduction	1
2	État des connaissances	4
2.1	La nature des sols	4
2.1.1	L'argile	4
2.1.2	Le sable et le silt	5
2.1.3	La matière organique	7
2.2	La surface chargée des sols	7
2.2.1	Les surfaces à charge fixe	8
2.2.2	Les surfaces à charge variable	8
2.3	Mécanismes de liaison entre le sol et les métaux lourds	9
2.3.1	Adsorption non spécifique	10
2.3.2	Adsorption spécifique	10
2.3.3	Précipitation	10
2.3.4	Influence du pH sur la sorption	13
2.3.5	Extraction séquentielle des métaux lourds	14
2.4	La nature du chrome dans les sols	16
2.4.1	Le chrome trivalent	16
2.4.2	Le chrome hexavalent	17
2.5	Principes de base de l'électrocinétique	17
2.5.1	Cellules électrochimiques	18
2.5.2	Réactions aux électrodes	19
2.5.3	Consommation d'énergie	21
2.6	Électrocinétique et lois de transport	21
2.6.1	Diffusion	22
2.6.2	Migration ionique	23
2.6.3	Nombre de transport	25
3	Sols testés	26
3.1	Analyses granulométriques	28
3.2	Analyses au microscope électronique	28
3.2.1	Pics de calcium	32
3.2.2	Comparaison du sol 5 à l'échantillon S49	32
3.3	Essais de capacité tampon	33
3.4	Résumé	34
3.4.1	Sol d'Ascot	34
3.4.2	Sol de Coaticook	35
3.4.3	Sol 4	35
3.4.4	Sol 5	35
4	Procédure expérimentale	36

4.1	Essais en cellule de 1 litre	38
4.1.1	Description du montage	38
4.1.2	Préparation du sol et des fluides de contrôle	40
4.1.3	Mise en place du sol.....	42
4.1.4	Contrôles et mesures durant les essais	42
4.1.5	Prise d'échantillons en cours d'essai	43
4.1.6	Prise d'échantillons et autres procédures en fin d'essai	44
4.2	Essai en cellule de 100 litres.....	45
4.2.1	Description du montage	45
4.2.2	Préparation du sol et des fluides de contrôle	48
4.2.3	Mise en place du sol	48
4.2.4	Contrôles et mesures durant l'essai	48
4.2.5	Prise d'échantillons en cours d'essai	50
4.2.6	Prise d'échantillons et autres procédures en fin d'essai	51
4.3	Analyse des échantillons de sol	52
4.3.1	Centrifugation et mesure de la concentration en métaux lourds dans le fluide interstitiel	53
4.3.2	Teneur en eau et préparation du sol	53
4.3.3	pH et essais de capacité tampon	53
4.3.4	Mesure de la concentration totale en métaux lourds	54
4.4	Analyse des accessoires	54
4.5	Analyse des échantillons de fluide	55
4.6	Tests de préacidification	55
5	Présentation des résultats	57
6	Essais préparatoires et réalisation de l'essai de 100 litres	65
6.1	Traitement d'un sol artificiellement contaminé au zinc	65
6.1.1	Conception de l'essai en cellule de 100 litres	66
6.1.2	Modélisation de la migration ionique	67
6.1.3	Migration du front acide et du front d'acétates.....	70
6.1.4	Adsorption non spécifique du zinc	74
6.2	Traitement d'un sol artificiellement contaminé au plomb et au cuivre.....	74
6.2.1	Choix de la teneur en eau initiale pour l'essai de 100 litres	75
6.2.2	Taux d'extraction obtenu lors de l'essai de 100 litres et nombre de charges ..	76
6.2.3	Influence du changement d'échelle sur la consommation d'énergie	77
6.2.4	Homogénéité d'un traitement par électrocinétique	80
6.2.5	Évolution de la température au cours de l'essai de 100 litres	80
6.2.6	Migration du front acide et du front d'acétates.....	83
6.2.7	Migration du plomb et du cuivre	86
6.2.8	Adsorption non spécifique du plomb et du cuivre	87
6.3	Conclusion	87
6.3.1	Essai en cellule de 100 litres	87
6.3.2	Migration ionique	88
7	Traitement de deux sols à forte teneur en carbonates	90
7.1	Traitement d'un sol industriel par voie acide	90
7.1.1	Avancée du front d'acétates	91

7.1.2	Texture du sol en fin d'essai	92
7.1.3	Effet du front acide sur les carbonates, les métaux lourds et la résistivité	94
7.1.4	Formation de complexes suite à la préacidification	95
7.1.5	Effets de la préacidification sur la décontamination du sol 4	98
7.2	Traitement par voie non acide d'un sol artificiellement contaminé	99
7.2.1	Effet de la préacidification et du contrôle à l'acétate de sodium	102
7.2.2	Effet du contrôle à l'eau du robinet	103
7.2.3	Effet du contrôle à l'acétate de calcium	103
7.2.4	Traitement du sol de Coaticook par voie acide	104
7.3	Conclusion	104
7.3.1	Caractéristiques de traitement reliées aux carbonates et migration ionique ..	105
7.3.2	Stratégies proposées	106
8	Traitement d'un sol industriel contaminé au chrome	107
8.1	Traitements contrôlés à l'acide acétique	108
8.1.1	Préacidification à l'acide chlorhydrique	109
8.1.2	Préacidification à l'acide nitrique	112
8.1.3	Préacidification à l'acide acétique	113
8.2	Traitement contrôlé à l'acide chlorhydrique	114
8.3	Conclusion	117
8.3.1	Source du problème de sorption	117
8.3.2	Essais proposés	118
8.3.3	Migration ionique	118
9	Conclusion	119
Annexe A	Résultats de l'essai CB1	122
Annexe B	Résultats de l'essai CB2	131
Annexe C	Résultats de l'essai CB3	140
Annexe D	Résultats de l'essai CB4	149
Annexe E	Résultats de l'essai CB5	158
Annexe F	Résultats de l'essai CB6	167
Annexe G	Résultats de l'essai CB7	176
Annexe H	Résultats de l'essai CB8	190
Annexe I	Résultats de l'essai CB12	200
Annexe J	Résultats de l'essai CB9	208
Annexe K	Résultats de l'essai CB10	217
Annexe L	Résultats de l'essai CB11	226
Annexe M	Résultats de l'essai CB13	234
Appendice 1	Calcul des vitesses de migration	243
Appendice 2	Calculs généraux	248
Appendice 3	Fractions d'un métal et ses complexes en solution	250
Bibliographie		251

Liste des figures

2.1 Représentation d'un feuillet tétraédrique(a), d'un feuillet octaédrique(b), d'un tétraèdre (c) et d'un octaèdre(d)	5
2.2 Structure du quartz	6
2.3 Réaction avec l'eau à la surface de la silice	8
2.4 Influence du pH sur la sorption	13
2.5 Cellule galvanique (a) et cellule d'électrolyse (b)	18
3.1 Courbes granulométriques des quatre sols testés	29
3.2 Analyse de la surface du sol d'Ascot au microscope électronique	30
3.3 Analyse de la surface du sol 4 au microscope électronique	30
3.4 Analyse de la surface du sol 5A (a) et du sol 5B (b) au microscope électronique	31
3.5 Analyse de la surface de l'échantillon S49 au microscope électronique	33
3.6 Courbes tampons	34
4.1 Schéma du montage utilisé.....	38
4.2 Plan détaillé de la cellule de 1 litre	39
4.3 Échantillonnage du sol en cours d'essai: cellule de 1 litre	43
4.4 Division du sol traité en seize tranches et échantillonnage en fin d'essai	44
4.5 Photographie de l'essai en cellule de 100 litres	46
4.6 Plan de la cellule de 100 litres	47
4.7 Photographie du dépôt de plomb et de cuivre formé à la cathode: cellule de 100 litres.	49
4.8 Échantillonnage du sol en cours d'essai: cellule de 100 litres	50
4.9 Échantillonnage dans chacune des sections(a) et sur deux plans horizontaux(b)	52
5.1 Répartition des métaux lourds dans un échantillon de sol	57
5.2 Étiquetage des tranches de sol et des plots	58
6.1 Modélisation simple de la migration ionique avant la rencontre des ions H^+ et des acétates (essais CB1 à CB4)	68
6.2 Migration du front acide et du front d'acétates	70
6.3 Variation de la densité de courant en fonction de la charge unitaire	79
6.4 Variation de la résistivité en fonction de la charge unitaire	79
6.5 Énergie volumique consommée en fonction de la charge unitaire	79
6.6 Répartition des concentrations au terme de l'essai CB5	81
6.7 Répartition des concentrations au terme de l'essai CB7	82
6.8 Évolution de la température au cours de l'essai de 100 litres	83
6.9 Influence de la concentration initiale sur la charge unitaire requise pour provoquer la rencontre du front acide et du front d'acétates	84
7.1 Progression du front acide et dissolution des carbonates	93
7.2 Complexes de zinc(a) et de plomb(b) formés suite à la préacidification	97

8.1	Progression du front d'acétates au cours de l'essai CB9: t=30h (a) et t=69,5h (b)	110
8.2	Progression du front d'acétates au cours de l'essai CB10: t=55h	112
8.3	Progression du front d'ions Cl ⁻ au cours de l'essai CB11: t=55h	115
8.4	Postacidification du sol de l'essai CB11	116
A.1	Distribution du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c)	124
A.2	Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	127
A.3	Variation dans le temps de la résistivité (a) et du débit électro-osmotique de l'anode vers la cathode (b)	130
B.1	Distribution du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c)	133
B.2	Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	136
B.3	Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique (b), de la conductivité et de la concentration en zinc dans le catholyte (c)	139
C.1	Distribution du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c)	142
C.2	Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	145
C.3	Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique de l'anode vers la cathode (b) et de la concentration en zinc dans le catholyte (c)	148
D.1	Distribution du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c)	151
D.2	Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	154
D.3	Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique (b), de la conductivité et de la concentration en zinc dans le catholyte (c)	157
E.1	Distribution du plomb et du cuivre après traitement (a et b) et distribution du pH (c) ..	160
E.2	Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	163
E.3	Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique (b), de la concentration du plomb et du cuivre et de la conductivité dans le catholyte (c)	166
F.1	Distribution du plomb et du cuivre après traitement (a et b) et distribution du pH (c) ..	169
F.2	Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	172
F.3	Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique (b), de la concentration du plomb et du cuivre et de la conductivité dans le catholyte (c)	175
G.1	Concentration en plomb et en cuivre dans deux carottes échantillonnées à t = 166,5h ..	178
G.2	Homogénéité du traitement sur un plan horizontal situé à 12,5cm de la base de l'échantillon	179
G.3	Homogénéité du traitement sur un plan horizontal situé à 37,5cm de la base de l'échantillon	180
G.4	Distribution du plomb et du cuivre après traitement (a et b) et distribution du pH (c) ..	181
G.5	Concentration en cuivre (a), en plomb (b) et pH en fonction du temps et de la position dans la partie supérieure (c)	182
G.6	Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	185
G.7	Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique (b), de la concentration en plomb et de la conductivité dans le catholyte (c)	188

G.8 Variation dans le temps de la concentration en cuivre et de la conductivité dans le catholyte (a), de la concentration en plomb (b), et en cuivre (c) et de la conductivité à l'anode	189
H.1 Distribution du plomb et du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c)	192
H.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	195
H.3 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du débit électro-osmotique (b)	199
I.1 Distribution du plomb et du cuivre après traitement (a et b) et distribution du pH (c) .	202
I.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	205
J.1 Distribution du plomb et du chrome après traitement (a et b) et distribution du pH - (c)	210
J.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	213
J.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique cathode vers - anode (b) et de l'extraction des métaux (c)	216
K.1 Distribution du plomb et du chrome après traitement (a et b) et distribution du pH - (c)	219
K.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	222
K.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique cathode vers - anode (b) et de l'extraction des métaux (c)	225
L.1 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	230
L.2 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique cathode vers - anode (b) et de l'extraction des métaux (c)	233
M.1 Distribution du plomb et du chrome après traitement (a et b) et distribution du pH - (c)	236
M.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c)	239
M.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique cathode vers - anode (b)	242

Liste des tableaux

1.1 Critères indicatifs du zinc, du chrome, du plomb et du cuivre	1
2.1 Produit de solubilité de sels métalliques	11
2.2 Potentiels de réduction standard	21
2.3 Coefficients de diffusion et mobilité ionique à dilution infinie	24
3.1 Caractéristiques générales des sols testés	27
4.1 Programme expérimental	37
5.1 Résumé des essais effectués avec le sol d'Ascot	59
5.2 Résumé des essais effectués avec deux sols à forte teneur en carbonates	60
5.3 Résumé des essais effectués avec un sol industriel contaminé principalement au chrome	61
5.4 Tests de préacidification conduits sur le sol 4	62
5.5 Tests de préacidification conduits sur le sol de Coaticook	62
5.6 Tests de préacidification conduits sur le sol 5A	63
5.7 Tests de préacidification conduits sur le sol 5B	63
5.8 Tests de postacidification conduits sur le sol 5	64
6.1 Migration du front d'acétates dans la zone V1-V2	72
6.2 Migration du front acide dans la zone V4-V5	73
6.3 Désorption du zinc dans les zones de pH élevé	74
6.4 Paramètres reliés à la migration du front d'acétates	85
6.5 Remplacement des nitrates dans la tranche 42-43	85
6.6 Désorption du plomb et du cuivre dans les zones de pH élevé	87
7.1 Comparaison des vitesses de migration des fronts d'acétates	92
7.2 Essais réalisés sur le sol de Coaticook par COUTURE (1994)	100
A.1 Caractérisation du sol avant traitement	123
A.2 Caractérisation du sol après traitement	123
A.3 Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	125
A.4 Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	126
A.5 Autres résultats	128
A.6 Bilan de masse	129
B.1 Caractérisation du sol avant traitement	132
B.2 Caractérisation du sol après traitement	132
B.3 Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	134
B.4 Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	135

B.5 Autres résultats	137
B.6 Bilan de masse	138
C.1 Caractérisation du sol avant traitement	141
C.2 Caractérisation du sol après traitement.....	141
C.3 Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	143
C.4 Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	144
C.5 Autres résultats.....	146
C.6 Bilan de masse	147
D.1 Caractérisation du sol avant traitement	150
D.2 Caractérisation du sol après traitement.....	150
D.3 Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	152
D.4 Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	153
D.5 Autres résultats.....	155
D.6 Bilan de masse	156
E.1 Caractérisation du sol avant traitement	159
E.2 Caractérisation du sol après traitement.....	159
E.3 Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	161
E.4 Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	162
E.5 Autres résultats.....	164
E.6 Bilan de masse	165
F.1 Caractérisation du sol avant traitement	168
F.2 Caractérisation du sol après traitement.....	168
F.3 Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	170
F.4 Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	171
F.5 Autres résultats	173
F.6 Bilan de masse	174
G.1 Caractérisation du sol avant traitement	177
G.2 Caractérisation du sol à t = 114h.....	177
G.3 Caractérisation du sol après traitement.....	177
G.4 Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	183
G.5 Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	184
G.6 Autres résultats	186
G.7 Évolution de la concentration dans les réservoirs	187
H.1 Caractérisation du sol avant traitement.....	191
H.2 Caractérisation du sol à t = 191h.....	191
H.3 Caractérisation du sol à t = 554h.....	191
H.4 Caractérisation du sol après traitement	191
H.5 Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	193
H.6 Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	194
H.7 Autres résultats.....	196
H.8 Bilan de masse	197

I.1	Caractérisation du sol avant traitement	201
I.2	Caractérisation du sol à t = 100h et à t = 146h	201
I.3	Concentration en calcium avant traitement et à t = 100h	201
I.4	Caractérisation du sol après traitement.....	201
I.5	Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	203
I.6	Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	204
I.7	Autres résultats	206
I.8	Bilan de masse	207
J.1	Caractérisation du sol avant traitement	209
J.2	Caractérisation du sol à t = 69,5h	209
J.3	Caractérisation du sol après traitement.....	209
J.4	Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	211
J.5	Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	212
J.6	Autres résultats.....	214
J.7	Bilan de masse	215
K.1	Caractérisation du sol avant traitement.....	218
K.2	Caractérisation du sol à t = 55h	218
K.3	Caractérisation du sol après traitement.....	218
K.4	Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	220
K.5	Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	221
K.6	Autres résultats.....	223
K.7	Bilan de masse	224
L.1	Caractérisation du sol avant traitement	227
L.2	Caractérisation du sol à t = 55h	227
L.3	Caractérisation du sol à t = 300,5h	227
L.4	Caractérisation du sol après traitement.....	227
L.5	Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	228
L.6	Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	229
L.7	Autres résultats.....	231
L.8	Bilan de masse	238
M.1	Caractérisation du sol avant traitement.....	235
M.2	Caractérisation du sol à t = 117h	235
M.3	Caractérisation du sol après traitement.....	235
M.4	Évolution du potentiel en fonction du temps et de la position	237
M.5	Évolution de la résistivité en fonction du temps et de la position	238
M.6	Autres résultats.....	240
M.7	Bilan de masse	241

Introduction

Suite à certaines opérations industrielles et à la disposition de déchets divers, les sols de certains sites deviennent contaminés par des métaux lourds tels le zinc, le chrome, le plomb et le cuivre. Dans ces cas, ces métaux sont présents à des concentrations qui excèdent les concentrations tolérées par les gouvernements. Par exemple, le ministère de l'Environnement et de la Faune du Québec (MEF) propose trois critères indicatifs de la contamination des sols. Le critère A est relatif aux contaminants se retrouvant de façon naturelle dans le milieu, le critère B est le seuil à partir duquel des analyses approfondies sont nécessaires, et le critère C est le seuil à partir duquel il peut y avoir nécessité d'une action correctrice dans un bref délai. Le tableau 1 donne les critères A, B et C des quatre métaux dont il est question dans ce document.

Tableau 1.1 Critères indicatifs du zinc, du chrome, du plomb et du cuivre

métaux	A mg/Kg de sol sec (ppm)	B mg/Kg de sol sec (ppm)	C mg/Kg de sol sec (ppm)
zinc	100	500	1500
chrome	75	250	800
plomb	50	500	1000
cuivre	50	100	500

source: MEF (1994) *Politique de réhabilitation des terrains contaminés*, 52 p.

Une méthode communément utilisée pour traiter les sites contaminés consiste à excaver le sol contaminé et transporter ce sol vers un endroit conçu pour l'isoler. Cette procédure s'avère très coûteuse et ne fait que remiser un sol potentiellement dangereux. Traiter le sol *in situ* ou en cellule de décontamination réglerait vraiment le problème et la décontamination par électrocinétique apparaît comme une technologie prometteuse. Il s'agit de développer cette technologie afin qu'elle soit économique et pratique.

Cette étude s'ajoute à trois autres projets de maîtrise déjà réalisés au département de génie civil de l'Université de Sherbrooke. BEAULIEU (1995), COUTURE (1994) et ÉTHIER (1993) ont appliqué l'électrocinétique pour extraire le plomb de sols contaminés en laboratoire. La revue de littérature extensive présentée par COUTURE (1994) montre que beaucoup de chercheurs se sont intéressés à la décontamination des sols par électrocinétique. Quelles aient été réalisées en laboratoire ou *in situ*, leurs recherches ont impliqué une gamme impressionnante de sols, de sédiments et de métaux lourds. Le potentiel de l'électrocinétique pour d'autres applications a aussi été vérifié par DERMOUNE (1992) et BURNOTTE (1993) à l'Université de Sherbrooke. Ces auteurs ont respectivement étudié l'induration des argiles molles et le contrôle de l'écoulement dans un sable silteux.

L'électrocinétique consiste à appliquer, à l'aide d'électrodes, une différence de potentiel électrique à un sol pour y extraire les métaux lourds. On voit un avantage dans l'exploitation du potentiel électrique en ce qu'il permet de mettre de côté le coefficient de perméabilité hydraulique. A priori, on traite alors aussi facilement un sol à caractère argileux qu'un sol à caractère sableux. De plus, la décontamination par électrocinétique peut se faire avec des sols ayant des teneurs en eau de 15 ou 20%. On explique plus en détail les principes de base de l'électrocinétique au chapitre 2 de ce mémoire.

Les trois objectifs principaux de cette étude sont de décrire l'effet du changement d'échelle, des carbonates et du chrome sur le traitement des sols par électrocinétique. Pour se faire, on dispose d'un total de treize essais réalisés avec deux sols industriels et deux sols contaminés en laboratoire. L'effet du changement d'échelle est analysé au chapitre 6, où l'on étudie les résultats de sept essais réalisés avec un sol contaminé en laboratoire. Un de ces essais a été réalisé avec une cellule de 100 litres dont les étapes de conception sont aussi présentées au chapitre 6. Au chapitre 7, on examine l'effet des carbonates à l'aide d'un essai effectué avec un sol industriel, et d'un autre effectué avec un sol contaminé en laboratoire. Au chapitre 8, l'effet du chrome est analysé à l'aide de quatre essais effectués avec un sol industriel. Au cours des chapitres 6, 7 et 8, on dégagera les faits permettant d'atteindre un objectif plus général: décrire la migration ou le mouvement des métaux lourds. La description des quatre sols en question, les procédures expérimentales détaillées, et la présentation des résultats des treize essais sont les sujets des chapitres 3, 4 et 5 respectivement.

En plus de présenter les principes de base de l'électrocinétique, le chapitre 2 présente aussi les notions de chimie des sols nécessaires à l'étude du comportement des quatre sols testés. Dans une première section on s'attarde à la minéralogie, ce qui amène à décrire, au cours de la section suivante, les sources responsables de la charge de surface des sols. La troisième section fait suite aux deux premières en exposant les mécanismes de liaison entre le sol et les métaux lourds. Toujours dans le domaine de la chimie des sols, une quatrième section est dédiée au chrome qui est un métal ayant la caractéristique d'être trivalent ou hexavalent, à la différence du zinc, du plomb et du cuivre qui sont bivalents.

L'aspect «transport des métaux lourds» est tout aussi important que l'aspect «liaison des métaux lourds avec le sol» dans un contexte de décontamination de sol. C'est pourquoi la dernière section du chapitre 2 est vouée aux lois de transport reliées à l'électrocinétique. Les notions de chimie des solutions pertinentes à cette étude seront introduites en cours d'analyse.

Chapitre 2

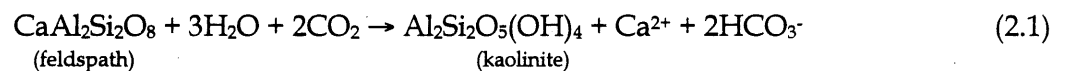
État des connaissances

2.1 La nature des sols

Le sol est un matériau poreux constitué d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une phase gazeuse. La phase gazeuse est absente lorsqu'un sol est dit saturé et, à l'inverse, la phase liquide est absente lorsqu'un sol est dit sec. La présente section intitulée «la nature des sols» fera référence à la phase solide. Cette phase comprend des composantes organiques et des composantes inorganiques [YONG et coll., 1992].

2.1.1 L'argile

Le terme «argile» peut faire référence à la fraction argileuse, c'est-à-dire les particules de sol plus petites que 2µm, ou bien à l'argile en tant que minéraux. Les minéraux argileux sont des aluminosilicates, particules très petites ayant un diamètre inférieur à 1µm [HOLTZ et coll., 1981]. Ce sont des minéraux issus de l'altération chimique d'autres minéraux, et on les classe ainsi dans la catégorie des minéraux secondaires. L'équation 2.1 décrit la dissolution d'un feldspath et sa transformation en un minéral argileux (kaolinite) [YONG et coll., 1992].



La structure des minéraux argileux est basée sur deux types de «feuillets» cristallins, les feuillets tétraédriques et octaédriques, que l'on peut visualiser sur les figures 2.1 (a) et 2.1 (b)

respectivement. L'agencement de ces feuillets en couches, les liens entre ces couches, et la présence de différents cations sont la source des différents minéraux argileux [YONG et coll., 1992]. La figure 2.1 (c) montre le tétraèdre étant à la base des feuillets tétraédriques. Il consiste en un atome de silicium entouré de quatre atomes d'oxygène. La figure 2.1 (d) montre l'octaèdre étant à la base des feuillets octaédriques. Il consiste en six atomes d'oxygène ou groupement OH entourant un atome d'aluminium, de magnésium, de fer ou un autre atome.

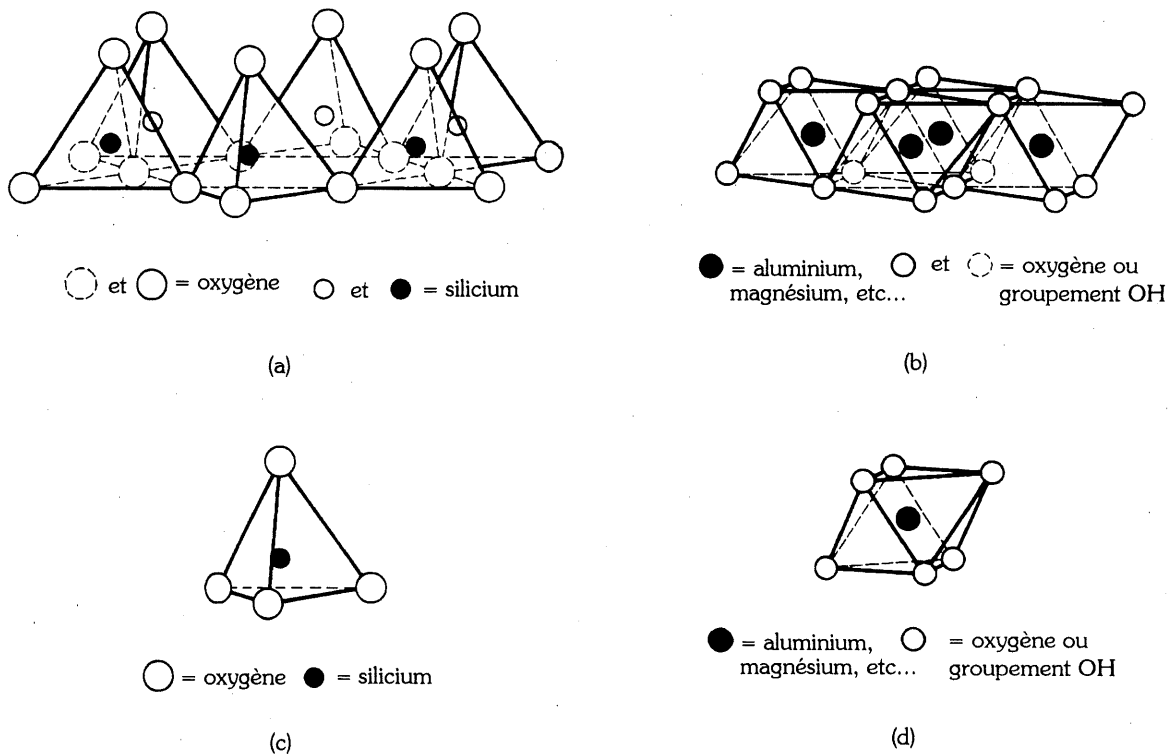


Figure 2.1 Représentation d'un feuillet tétraédrique(a), d'un feuillet octaédrique(b), d'un tétraèdre(c) et d'un octaèdre(d)

source: HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. (1981) *An introduction to geotechnical engineering*, États-Unis, Prentice-Hall, Inc., 733p.

2.1.2 Le sable et le silt

Le sable et le silt sont des particules de sol ayant un diamètre plus grand que $2\mu\text{m}$. Ce sont des minéraux primaires, c'est-à-dire des matériaux issus de l'altération physique (fissuration, abrasion) de la roche mère. Le quartz est parmi les minéraux primaires les plus abondants dans les sols [YONG et coll., 1992]. DANA (1957) classe le quartz (SiO_2) dans la

catégorie des silicates plutôt que dans la catégorie des oxydes parce que, dans sa structure, le quartz montre le même tétraèdre que l'on retrouve dans la structure des argiles. Cependant, l'arrangement des tétraèdres est tridimensionnel plutôt qu'en feuille. La figure 2.2 montre la structure du quartz où on peut voir que chacun des atomes d'oxygène est partagé par deux tétraèdres, d'où la formule SiO_2 .

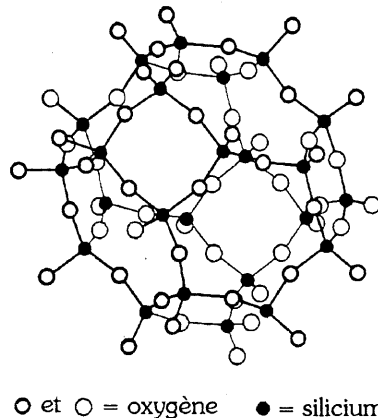


Figure 2.2 Structure du quartz

source: DANA, J.D. (1957) *Dana's manual of mineralogy*, États-Unis, 16^e édition, John Wiley & sons, 530 p.

Les feldspaths sont aussi parmi les minéraux primaires les plus abondants dans les sols. En moyenne, les roches sont constituées à 60% de ces minéraux [YONG et coll., 1992]. Ce sont des silicates d'aluminium incluant du potassium, du sodium, du calcium, et dont la structure est aussi un réseau tridimensionnel. L'orthoclase (KAlSi_3O_8), l'albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) et l'anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) sont des exemples de feldspaths très communs [DANA, 1957].

Tout comme les silicates, les oxydes constituent une classe distincte de minéraux. Cette classe englobe les oxydes simples, les oxydes multiples, les oxydes contenant le groupe OH (oxyhydroxydes) et les hydroxydes [DANA, 1957]. Bien qu'on le retrouve classé parmi les silicates, le quartz peut aussi être classé parmi les oxydes [YONG et coll., 1992; PARKS, 1966]. Outre le quartz, on retrouve l'hématite (Fe_2O_3) parmi les oxydes répandus. La goethite ($\text{FeO}(\text{OH})$) est un oxyhydroxyde de fer aussi très répandu [YONG et coll., 1992; DANA, 1957].

Dans un sol, les oxydes et les oxyhydroxydes ne se retrouvent pas nécessairement sous forme de grains bien cristallisés, ayant le diamètre d'un silt ou d'un sable. JENNE, cité par GADDE et coll. (1974), soutient que les oxyhydroxydes se retrouvent généralement sous forme d'une couche enrobant des grains de sol tels les silicates. Aussi, YONG et coll. (1992) mentionnent que l'on peut retrouver la silice (SiO_2) et le fer sous forme amorphe dans un sol.

Les carbonates font partie d'une famille de minéraux contenant le radical CO_3^- dans leurs formules chimiques. La calcite (CaCO_3) est l'un des plus communs et des plus répandus des minéraux. On retrouve la calcite dans d'énormes masses de roche sédimentaire où elle est le minéral dominant, et dans certains calcaires, c'est le seul minéral présent [DANA, 1957]. Les sols dérivés de ces roches contiennent donc de la calcite que l'on retrouve sous forme de particules ou d'enveloppe recouvrant d'autres particules [YONG et coll., 1992].

2.1.3 La matière organique

Les sols contiennent une grande variété de substances organiques, molécules composées de carbone et d'hydrogène et dont le carbone forme le squelette. La matière organique est habituellement peu abondante dans les sols de surface. Les teneurs en matière organique habituellement relevées vont de 0,5% à 5% (masse) sauf pour la tourbe qui peut être faite à 100% de matière organique [YONG et coll., 1992].

2.2 La surface chargée des sols

Les particules de sol, en particulier celles de la fraction argileuse, ont fréquemment la caractéristique d'être chargées électriquement [EVANS, 1989]. PARKS (1966) ajoute que les grains de sable et de silt sont aussi chargés électriquement. Cependant, les sables et les silts ont une surface spécifique plus petite que celle des argiles, et ils jouent donc un rôle moins important dans le cadre de l'interaction sol et contaminants. Les particules de la fraction argileuse mais aussi la matière organique jouent le rôle le plus important [YONG et coll., 1992]. La charge à la surface d'une particule de sol peut être fixe, variable ou une combinaison des deux [YONG et coll., 1992; EVANS, 1989].

2.2.1 Les surfaces à charge fixe

Ce type de surface est exclusivement associé aux minéraux argileux à l'intérieur desquels il peut exister un déséquilibre de charges. Ce déséquilibre est dû à des substitutions isomorphes, c'est-à-dire des substitutions d'ions ayant un diamètre semblable mais n'ayant pas la même charge. La substitution d'un ion Si^{4+} par un ion Al^{3+} génère une charge négative dans un feuillet tétraédrique alors que la substitution d'un ion Al^{3+} par un ion Mg^{2+} ou d'un ion Mg^{2+} par un ion Li^+ génère une charge négative dans un feuillet octaédrique [EVANS, 1989].

2.2.2 Les surfaces à charge variable

PARKS (1966) et SMITH et coll. (1991) affirment que les surfaces à charge variable sont associées aux oxydes. EVANS (1989) ajoute que les surfaces à charge variable sont aussi associées aux hydroxydes, aux oxyhydroxydes et aux arêtes des minéraux argileux. PARKS (1966) utilise l'exemple de la silice (SiO_2) pour expliquer le développement d'une charge variable à la surface des oxydes. La figure 2.3(a) illustre un fragment de silice dans le vide. Dans cette condition, la charge nette à la surface du fragment est probablement négligeable. Lorsque le fragment est exposé à la vapeur d'eau (figure 2.3(b)) les sites chargés sont convertis en groupement MOH , où M représente le métal faisant partie de la surface (dans ce cas le silicium). Une surface «hydroxylée» comme celle de la figure 2.3(b) devrait se former à la surface de tous les oxydes ayant la chance de venir en équilibre avec un environnement aqueux [PARKS, 1966].

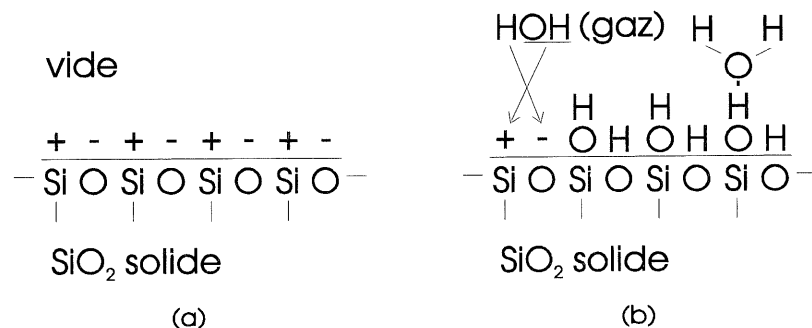
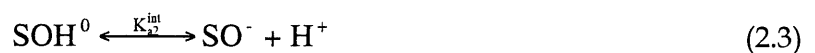


Figure 2.3 Réaction avec l'eau à la surface de la silice

source: PARKS, G.A. (1966) *Aqueous surface chemistry of oxides and complex oxide minerals*, Equilibrium concepts in natural water systems, Stumm, p. 121-160.

Une charge se développe sur une surface «hydroxylée» via l'association ou la dissociation des ions H^+ avec les groupements MOH . L'amplitude et le signe de la charge dépendent alors du pH du sol [EVANS, 1989]. Le PZC («point of zero charge») est le pH qui confère au sol une charge neutre. Lorsque le pH du sol est plus bas que le PZC la charge de surface est positive. Inversement, la charge de surface est négative lorsque le pH est plus élevé que le PZC. SMITH et coll. (1991), EVANS (1989) et PARKS (1966) formulent l'interaction des ions H^+ avec la surface des oxydes comme suit:



On note que la lettre M a été remplacée par la lettre S (pour «surface») dans les équations 2.2 et 2.3. EVANS (1989) explique que les réactions de surfaces décrites par ces deux équations sont analogues aux réactions d'équilibre des acides faibles.

2.3 Mécanismes de liaison entre le sol et les métaux lourds

La charge de surface des sols leur procure la capacité de réagir avec les espèces ioniques dissoutes dans l'eau des pores. Notamment, les sols peuvent retenir et accumuler des métaux lourds sur leur surface par des processus d'adsorption non spécifique, d'adsorption spécifique et de précipitation. Ces trois mécanismes sont le sujet des sections 2.3.1, 2.3.2 et 2.3.3 respectivement.

YONG et coll. (1992) mentionnent que ces mécanismes de rétention n'agissent généralement pas de façon exclusive, chacun des mécanismes pouvant être plus ou moins dominant en fonction de l'environnement chimique. Pour cette raison il peut être difficile de faire la distinction entre l'adsorption non spécifique, l'adsorption spécifique et la précipitation. Sans faire de distinction entre ces trois processus de rétention, on montre comment le pH du sol influence la rétention des métaux lourds à la section 2.3.4. À la section 2.3.5 on examine quatre formes sous lesquelles les métaux lourds peuvent être fixés à un sol.

2.3.1 Adsorption non spécifique

Lorsqu'ils sont en solution aqueuse, les cations sont entourés d'une sphère constituée de molécules d'eau et on dit alors que se sont des cations hydratés. Un cation hydraté est adsorbé de façon non spécifique ou non sélective lorsque sa liaison avec la surface négative d'un sol n'entraîne pas la perte de son eau d'hydratation [EVANS, 1989]. Une telle liaison est de nature électrostatique et est relativement faible. En raison de cette faible liaison les cations adsorbés peuvent être facilement remplacés ou échangés par d'autres cations. EVANS (1989) affirme que le processus d'échange cationique est rapide et facilement réversible. Selon YONG et coll. (1992), plus la valence d'un cation est grande plus sa capacité à remplacer d'autres cations échangeables est grande.

Des réactions d'échange anionique peuvent être impliquées lorsque des anions doivent satisfaire la surface positive d'un sol. Parmi les anions échangeables on retrouve les ions Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} et ClO_4^- . Tout comme les cations échangeables, ces anions sont liés de façon électrostatique à la surface d'un sol [YONG et coll., 1992].

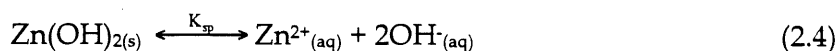
2.3.2 Adsorption spécifique

L'autre mécanisme d'adsorption d'ions est une réaction chimique qui implique des liens covalents et une énergie d'activation. On parle alors d'adsorption spécifique, de chimisorption ou d'échange de ligands. Dans ce cas la désorption peut être difficilement effectuée. La plupart des anions et plusieurs cations métalliques peuvent s'adsorber de façon spécifique sur la surface chargée des sols. Sur les sols à charge variable l'adsorption spécifique est particulièrement importante pour les métaux qui s'hydrolysent facilement et pour les métaux qui forment des oxyanions comme le chromate (CrO_4^{2-}) par exemple [EVANS, 1989].

2.3.3 Précipitation

Le fait d'ajouter au sol de grandes quantités de métaux lourds peut résulter en la précipitation de ces derniers. Les plus importants des précipités rencontrés sont les oxydes, les

oxyhydroxydes, les hydroxydes et les carbonates [EVANS, 1989]. Le produit de solubilité permet de décrire la dissolution et la précipitation d'un sel comme l'hydroxyde de zinc ($\text{Zn}(\text{OH})_2$). Pour la réaction:



le produit de solubilité est donné par:

$$K_{sp} = [\text{Zn}^{2+}] [\text{OH}^{-}]^2 = 3,0 \times 10^{-16} \text{ à } 25^{\circ}\text{C} \quad (2.5)$$

où [] exprime la concentration. Dans une solution saturée le produit de solubilité est atteint et les ions en excès précipitent sous forme de $\text{Zn}(\text{OH})_2$. D'un autre côté, lorsque la solution n'est pas saturée le produit $[\text{Zn}^{2+}] [\text{OH}^{-}]^2$ n'atteint pas $3,0 \times 10^{-16}$. À titre d'exemple, on examine la solubilité de l'hydroxyde de zinc en fonction du pH dans une solution concentrée à 0,24M de Zn^{2+} (ce qui correspond à 16 000ppm). À partir de l'équation 2.5 on calcule que la concentration admissible en ions OH^{-} , avant saturation, est de $\sqrt{3,0 \times 10^{-16} / 0,24} = 3,5 \times 10^{-8}\text{M}$. Considérant la constante de dissociation de l'eau ($K_w = [\text{OH}^{-}] [\text{H}^{+}] = 10^{-14}$), on calcule que le Zn^{2+} aura tendance à précipiter sous forme d'hydroxyde à un pH supérieur ou égal à 6,54. La précipitation du zinc et d'autres métaux lourds comme le plomb, le cuivre et le chrome peut se faire avec d'autres anions comme les carbonates, qui sont susceptibles d'être présents dans un sol. Le tableau 2.1 donne les produits de solubilité associés aux hydroxydes et aux carbonates de zinc, de plomb, de cuivre et de chrome.

Tableau 2.1 Produit de solubilité de sels métalliques

anions associés au →	produit de solubilité (K_{sp})			
	zinc	plomb	cuivre	chrome
hydroxyde (OH^{-})	$3,0 \times 10^{-16}$	$11,42 \times 10^{-20}$	$4,8 \times 10^{-20}$	$1,6 \times 10^{-30}$ ($\text{Cr}(\text{OH})_3$)
carbonate (CO_3^{2-})	$1,0 \times 10^{-10}$	$7,4 \times 10^{-14}$	$2,3 \times 10^{-10}$	n.d.

source: HARRIS, D.C. (1991) *Quantitative chemical analysis*, États-Unis, 3^e édition, W.H. Freeman and company, 782 p.

¹ source: LIDE, D. R. (1992) *CRC handbook of chemistry and physics*, Boca Raton (États-Unis), 73^e édition, CRC press, pagination multiple

Les valeurs du produit de solubilité présentées au dernier tableau sont valides pour une solution aqueuse et des conditions précises (force ionique à peu près nulle et $T = 25^{\circ}\text{C}$). Dans le cas d'un sol les conditions peuvent être bien différentes et on doit alors utiliser des données comme celles du tableau 2.1 avec précaution. Par exemple, YONG et coll. (1993) ont étudié la sorption du zinc, du plomb, du cuivre et du cadmium dans une suspension contenant une argile naturelle ayant une teneur en carbonates de 9,7%. Leurs résultats montrent que les quatre métaux ont précipité à des pH (pH de la suspension) inférieurs à ceux prédits par les produits de solubilité. Selon les auteurs, la précipitation précoce des métaux serait associée au fait que la surface des sols procure des sites favorables au développement de précipités.

D'autre part, UDO et coll. (1970) ont mené des expériences sur des suspensions de sols calcaires pour étudier la sorption du zinc. Dans les cas où la quantité de zinc ajoutée était grande et permettait de combler la capacité d'adsorption des sols, ils ont calculé le produit $[\text{Zn}^{2+}] [\text{OH}]^2$ et ils ont obtenu des valeurs situées entre 10^{-17} et 10^{-16} pour sept sols. Ces valeurs correspondent assez bien au produit de solubilité de l'hydroxyde de zinc ($3,0 \times 10^{-16}$).

KALBASI et coll. (1978) ont étudié la formation du carbonate et de l'hydroxyde de zinc dans quatre sols. Leurs travaux sont intéressants puisqu'ils ont utilisé la technique de diffraction aux rayons X pour identifier les composés de zinc formés. L'ajout d'une quantité suffisante de sulfate de zinc (ZnSO_4) dans un sol non calcaire a conduit à la précipitation du zinc sous forme d'hydroxyde. Cependant, le zinc a persisté sous cette forme seulement durant deux semaines. Ce fait est en accord avec les travaux de KRAUSKOPF (cité par KALBASI et coll. (1978)) qui ont montré que l'hydroxyde de zinc précipité n'est pas stable et se décompose en oxyde de zinc (ZnO).

L'ajout de sulfate de zinc dans deux sols calcaires a conduit à la précipitation du zinc sous forme de carbonates (ZnCO_3) dans un cas et sous forme de $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$ dans l'autre. Ces formes de zinc ont persisté pour au moins seize semaines. EVANS (1989) indique que l'existence du zinc, du plomb et du cadmium, précipités sous forme cristalline dans les sols, n'a pas souvent été rapportée. Il ajoute que la plupart des phases minérales formées dans les sols consistent en un mélange de solides dans lequel les métaux lourds ne représentent qu'une faible proportion.

2.3.4 Influence du pH sur la sorption

Quand il est difficile de faire la distinction entre l'adsorption non spécifique, l'adsorption spécifique et la précipitation, le terme sorption est utilisé pour indiquer le transfert général de matière sur le sol [YONG et coll., 1992]. Le but de cette section est de montrer que l'augmentation du pH du fluide interstitiel d'un sol est propice à la sorption des métaux lourds. On a constaté auparavant que les métaux lourds peuvent précipiter sous forme d'hydroxydes lorsque le pH du fluide environnant augmente à une valeur critique. Au-dessous de ce pH critique, la sorption (ou la désorption) des métaux lourds est aussi gouvernée par le pH. FARRAH et coll. (1977) expliquent que la diminution du pH (augmentation de la concentration en ions H^+) permet aux ions H^+ d'être plus compétitifs et donc d'occuper les sites d'adsorption au détriment des autres cations. Pour des pH inférieurs au pH de précipitation, la figure 2.4 montre le logarithme de la quantité de métal sorbé sur trois argiles en fonction du pH (pH du liquide de la suspension) pour le zinc, le plomb, le cuivre et le cadmium. Comme le montre cette figure, plus le pH est bas plus les métaux se désorbent.

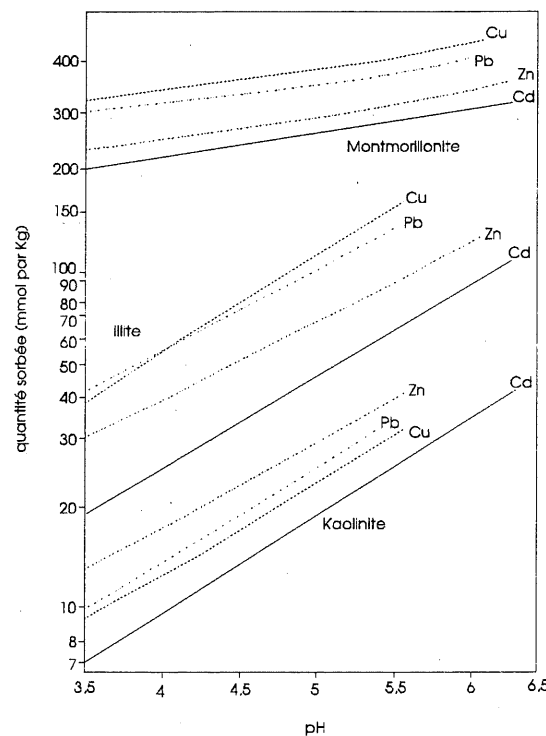


Figure 2.4 Influence du pH sur la sorption (quantité initiale de métaux en solution: $1,7 \times 10^{-4} M$)
source: FARRAH, H., PICKERING, W.F. (1977) *Influence of clay-solute interactions on aqueous heavy metal ion levels*, *Water, air, and soil pollution*, 8, p. 189-197.

Les travaux de HARTER (1983), effectués sur quatre sols, démontrent aussi que l'abaissement du pH solubilise les métaux lourds (zinc, plomb, cuivre et nickel dans ce cas). GADDE et coll. (1974) ont effectué des expériences semblables à celle de FARRAH et coll. (1977) et HARTER (1983). Cependant, au lieu d'utiliser du sol ils ont utilisé un oxyhydroxyde de fer fabriqué en laboratoire. Le comportement des métaux lourds (zinc, plomb et cadmium dans ce cas) en fonction du pH s'est avéré similaire au comportement observé lors des expériences effectuées avec des sols.

2.3.5 Extraction séquentielle des métaux lourds

La méthode de l'extraction séquentielle sélective est utile pour étudier les mécanismes qui lient les métaux lourds aux sols. Cette procédure est basée sur le fait que les métaux lourds, retenus sous différentes formes dans les sols, peuvent être extraits sélectivement en utilisant les réactifs appropriés [TESSIER et coll. cités par YONG et coll., 1993]. La liste suivante décrit les quatre phases principales sous lesquelles les métaux lourds peuvent exister dans les sols. Aussi, dans la liste on énumère quelques-uns des produits d'extraction utilisés lors de différentes recherches menées sur l'extraction séquentielle [YONG et coll., 1993]:

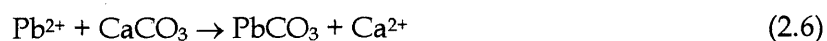
Échangeable

Les métaux de cette phase sont adsorbés de façon non spécifique et ils peuvent être remplacés par des cations compétitifs.

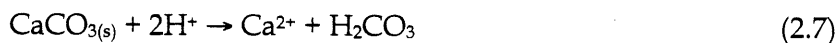
Produits d'extraction: CaCl₂ (chlorure de calcium)
MgCl₂ (chlorure de magnésium)
KNO₃ (nitrate de potassium)
NH₄OAc (acétate d'ammonium)

Carbonates

Les métaux de cette phase sont précipités sous forme de carbonates [YONG et coll., 1993]. RICKARD et NRIAGU, cités par COUTURE (1994) expliquent que le plomb a aussi tendance à s'associer aux carbonates des sols basiques par déplacement du calcium:



Les métaux lourds associés aux carbonates peuvent être libérés par acidification. GERMAIN et coll. (1993) mentionnent que la dissolution du carbonate de calcium peut être représentée par les réactions suivantes lorsque le pH est plus petit que 6,0:



L'équation 2.7 décrit la solubilisation du calcium mais on peut imaginer que le plomb ou d'autres métaux lourds sous forme de carbonates se dissolvent de la même façon que le calcium.

Produits d'extraction: Na₂EDTA
NaOAc pH=5 (acétate de sodium)

Oxydes-hydroxydes

Les métaux considérés ici sont ceux liés aux oxydes, hydroxydes et oxyhydroxydes de fer, d'aluminium et de manganèse faiblement cristallisés ou amorphes. Le produit d'extraction généralement utilisé est un agent réducteur acide:

NH₂OH·HCl («hydroxylamine hydrochloride» dilué dans de l'acide acétique 25% v/v)

L'ajout de ce produit permet de dissoudre les oxydes, hydroxydes et oxyhydroxydes sans dissoudre les silicates ou la matière organique.

Matière organique

Les liens entre les métaux lourds et la matière organique sont généralement très forts et l'utilisation d'oxydants puissants est nécessaire à la libération des métaux lourds.

Produits d'extraction: H₂O₂ (peroxyde) et HNO₃ (acide nitrique)

On remarque que la procédure d'extraction séquentielle comporte certaines défaillances quant au chevauchement des phases. Par exemple, l'utilisation d'un produit acide pour extraire les métaux lourds de la phase «carbonates» pourrait avoir pour effet de solubiliser une partie des métaux lourds précipités sous forme d'hydroxydes.

2.4 La nature du chrome dans les sols

Le chrome est le septième élément le plus abondant sur terre mais il ne se rencontre généralement qu'à l'état de traces (c.- à - d. $< 1000\text{ppm}$). Ce métal peut prendre neuf états d'oxydation différents, de (-II) à (VI), mais seuls le chrome trivalent (Cr(III)) et le chrome hexavalent (Cr(VI)) sont communs en milieu naturel. Tout le chrome d'origine naturelle présent dans la plupart des sols l'est sous forme de Cr(III) alors que le Cr(VI) provient plutôt d'opérations industrielles. Les tanneries, les industries métallurgiques et les usines de placage sont des exemples d'industries pouvant rejeter du chrome dans les sols [GOUVERNEMENT DU CANADA, 1994].

2.4.1 Le chrome trivalent

En général, le Cr(III) se retrouve sous forme cationique dans les sols, et de ce fait, il est souvent adsorbé à ceux-ci [GOUVERNEMENT DU CANADA, 1994; STURGES et coll., 1992]. PULS et coll. (1994) vont plus loin en affirmant que le Cr(III) est fortement et spécifiquement adsorbé aux sols. On voit ainsi que le Cr(III) peut s'accumuler et persister dans les sédiments et les sols [GOUVERNEMENT DU CANADA, 1994].

Le Cr(III) est relativement insoluble dans l'eau surtout si le pH se situe entre 6 et 12 [BARTLETT et coll., 1988; PULS et coll., 1994]. Au-dessus d'un pH de 5, la formation d'hydroxyde de chrome (Cr(OH)_3) serait le principal facteur responsable de l'insolubilité du Cr(III) mais le Cr(III) forme aussi des oxydes et des phosphates hautement insolubles [GOUVERNEMENT DU CANADA, 1994; STURGES et coll., 1992]. Dans LIDE (1992) on considère que le chlorure de chrome (CrCl_3) est insoluble. Malgré tout, le Cr(III) peut former des complexes stables avec beaucoup de ligands organiques ou inorganiques, et ce, dans une variété de couleurs et à un rythme relativement lent [GOUVERNEMENT DU CANADA, 1994; BARTLETT et coll., 1988].

BARTLETT et coll. (1988) mentionnent que l'oxydation du Cr(III) en Cr(VI) se produit seulement dans des circonstances environnementales très particulières. Lorsqu'elle se produit, l'oxydation du Cr(III) en Cr(VI) semble largement gouvernée par des oxydes de manganèse enveloppant les particules de sol ou sous forme de petits grains [PULS et coll., 1994; BARTLETT et coll., 1988]. En petite quantité le Cr(III) n'est pas considéré comme très dangereux pour l'environnement puisque, comme nous l'avons vu, il est peu mobile et est aussi incapable de pénétrer les membranes biologiques [GOUVERNEMENT DU CANADA, 1994].

2.4.2 Le chrome hexavalent

Contrairement au Cr(III), le Cr(VI) ne s'adsorbe pas facilement sur les surfaces de sol et il est passablement soluble [GOUVERNEMENT DU CANADA, 1994]. STURGES et coll. (1992) considèrent que les formes de Cr(VI) sont très solubles. Le Cr(VI) est généralement anionique et ses formes principales sont le chromate (CrO_4^{2-}), l'hydrochromate (HCrO_4^-) et le dichromate ($\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$) [GOUVERNEMENT DU CANADA, 1994; PULS et coll., 1994; STURGES et coll., 1992].

HARRIS (1991) indique que le dichromate de potassium est un oxydant puissant et que le peroxyde (H_2O_2) peut réduire l'anion dichromate en Cr^{3+} dans une solution acide. Plusieurs études ont démontré que la réduction du Cr(VI) en Cr(III) est favorisée sous des conditions acides avec ou sans matières organiques [PULS et coll., 1994]. Le Cr(VI) est considéré comme dangereux parce qu'il est mobile, et qu'il a la capacité de pénétrer les membranes biologiques et d'oxyder les composantes cellulaires [ROSS et coll., 1981].

2.5 Principes de base de l'électrocinétique

La présente section se veut un aperçu des notions d'électrochimie et d'électricité sur lesquelles la technologie électrocinétique est basée. Premièrement, au terme d'une comparaison entre une cellule d'électrolyse et une cellule galvanique (pile), on explique que le type de cellule utilisée pour décontaminer les sols par électrocinétique est semblable à une cellule d'électrolyse. Par la suite, on décrit les réactions aux électrodes et leur impact sur le traitement par

électrocinétique, et on examine la relation entre le courant électrique et les réactions aux électrodes. Finalement, on fait ressortir les principaux facteurs liés à la consommation d'énergie lors d'un traitement par électrocinétique.

2.5.1 Cellules électrochimiques

Les cellules électrochimiques sont des appareils munis de deux électrodes, une positive et l'autre négative, pouvant être reliées par un circuit conducteur d'électrons. Chacune des électrodes est en contact avec un électrolyte (liquide conducteur) dans lequel les mouvements d'ions sont responsables du transport du courant électrique. On classe les cellules électrochimiques en cellules galvaniques et cellules d'électrolyse. Une cellule galvanique est une cellule dans laquelle des réactions se produisent spontanément aux électrodes lorsqu'elles sont reliées à l'extérieur de la cellule par un conducteur. La cellule est dans ce cas une force électromotrice (F.E.M.). Ce type de cellule est utilisé le plus souvent pour convertir de l'énergie chimique en énergie électrique [BARD et coll., 1983]. Une cellule d'électrolyse est une cellule dans laquelle des réactions sont effectuées en imposant une tension extérieure supérieure au potentiel réversible de la cellule. Ce type de cellule est généralement utilisé pour effectuer des réactions chimiques en consommant de l'énergie électrique [BARD et coll., 1983]. C'est ce dernier type de cellule qui est utilisée en décontamination des sols par électrocinétique.

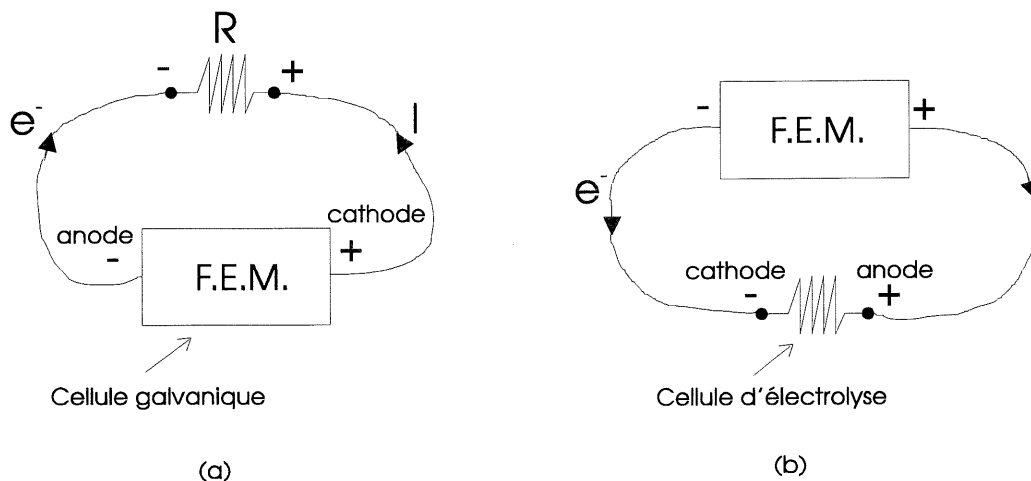


Figure 2.5 Cellule galvanique (a) et cellule d'électrolyse (b)

La figure 2.5, les définitions suivantes et la convention selon laquelle le courant électrique circule du pôle positif vers le pôle négatif (sens inverse des électrons) montrent que dans une cellule d'électrolyse la cathode est l'électrode négative et l'anode l'électrode positive. Il en est de même lors d'un traitement par électrocinétique.

Oxydation: perte d'électron(s)

Réduction: gain d'électron(s)

Cathode: électrode où la réduction se produit

Anode: électrode où l'oxydation se produit

2.5.2 Réactions aux électrodes

La conversion d'un courant ionique à un courant électronique, et vice-versa, se fait par des réactions d'oxydoréduction aux électrodes. L'oxydation de l'eau à l'anode favorise la diminution du pH (équation 2.9) alors que la réduction de l'eau à la cathode favorise l'augmentation du pH (équation 2.10).



Les ions H^+ produits à l'anode sont attirés vers la cathode (électrode négative) et cela engendre l'avancée d'un front acide vers la cathode. Ce phénomène est utile puisque la baisse du pH dans le sol favorise la désorption des métaux lourds. Ces derniers peuvent alors progresser à leur tour vers la cathode et y être extraits (les métaux lourds sont généralement cationiques).

L'avancée du front acide dans le sol peut être ralentie par des facteurs comme une capacité d'échange cationique élevée, une teneur en matières organiques élevée et une teneur en carbonates élevée. En effet, ACAR et coll. (1993) indiquent que ces facteurs contribuent à augmenter la capacité tampon des sols. Les ions OH^- générés à la cathode engendrent l'avancée d'un front basique vers l'anode et ce phénomène favorise la sorption des métaux lourds s'il n'est pas contrôlé. On peut contrôler la génération d'ions OH^- en faisant circuler un acide à la cathode.

On peut faire le lien entre la quantité d'ions H^+ et OH^- produits et le courant électrique (I) à partir de l'équation 2.11 (la constante de Faraday (F) a une valeur de 96 485C/mole d' e^-) qui décrit la relation entre le courant et le nombre de moles d'électrons (n) qui circulent durant un intervalle de temps (t).

$$n = \frac{It}{F} \quad (2.11)$$

Sachant que n moles d'électrons ont circulé durant un certain intervalle de temps, on peut dire que n moles d'ions H^+ et OH^- ont été générées. Cependant, cette dernière affirmation est vraie seulement si les réactions décrites par les équations 2.9 et 2.10 sont les seules se produisant aux électrodes.

En réalité, d'autres réactions d'oxydoréduction peuvent se produire aux électrodes comme l'oxydation du chlore à l'anode (équation 2.12) ou la réduction des métaux lourds à la cathode (équation 2.13).



Une réaction comme celle décrite par l'équation 2.13 est très utile puisqu'elle permet de recueillir les métaux lourds sous forme solide et très concentrée. Néanmoins, comme en témoigne le tableau 2.2, les métaux lourds ne se solidifient pas tous avec la même facilité. L'examen de ce tableau montre que le zinc et le chrome, par rapport au cuivre et au plomb, ont une faible tendance à se réduire (ou s'électrodeposer) sous des conditions standards (lorsque l'activité des espèces est égale à 1). Les valeurs du tableau 2.2 sont relatives à l'électrode hydrogène dont le potentiel de réduction standard est arbitrairement fixé à zéro. Lorsqu'elle se produit, l'électrodeposition des métaux lourds à la cathode a aussi l'avantage de se faire au détriment de la production d'ions OH^- qui on le sait, sont indésirables. Contrairement à l'équation 2.13, la réaction décrite par l'équation 2.12 n'est pas souhaitable puisqu'elle diminue la production d'ions H^+ à l'anode.

Tableau 2.2 Potentiels de réduction standard

réaction	potentiel standard de réduction (volts)
$\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cu}_{(\text{s})}$	0,339
$\text{Pb}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Pb}_{(\text{s})}$	-0,126
$\text{Cr}^{3+} + 3\text{e}^- \leftrightarrow \text{Cr}_{(\text{s})}$	-0,74
$\text{Zn}^{2+} + 2\text{e}^- \leftrightarrow \text{Zn}_{(\text{s})}$	-0,762

source: HARRIS, D.C. (1991) *Quantitative chemical analysis*, États-Unis, 3^e édition, W.H. Freeman and company, 782 p.

2.5.3 Consommation d'énergie

La consommation d'énergie est un facteur déterminant lorsque l'on veut évaluer l'efficacité d'un traitement par électrocinétique. L'équation 2.14 montre que la consommation d'énergie (E) est fonction de la durée d'un traitement (t), du courant électrique (I) et de la résistance qu'offre la cellule de traitement (R). La résistance est elle-même fonction de la résistivité du sol et des fluides à l'intérieur de la cellule (ρ), et de la géométrie de la cellule (A est la section et L est la longueur de la cellule) comme indiqué par l'équation 2.15.

$$E = RI^2t \quad (2.14)$$

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (2.15)$$

2.6 Électrocinétique et lois de transport

Dans un système électrocinétique, le transport des contaminants dans les sols se fait via le fluide interstitiel et se sont principalement les phénomènes d'advection, d'électro-osmose, de diffusion et de migration ionique qui régissent ce transport. Le transport par advection se fait sous un gradient hydraulique et ce n'est pas un sujet relié directement à cette recherche. Un des thèmes du mémoire de COUTURE (1994) est d'ailleurs le lessivage d'un sol sous un gradient hydraulique. CASAGRANDE (1952), GRAY et coll. (1967) et MITCHELL (1976) montrent l'intérêt pratique de l'électro-osmose pour transporter l'eau dans les sols fins. Cependant, le candidat a choisi de ne pas traiter en profondeur de l'électro-osmose puisque ÉTHIER (1993)

présente une revue de ce sujet dans son mémoire de maîtrise. Néanmoins, on rappelle que le débit dû à l'électro-osmose s'exprime par l'équation suivante:

$$Q_e = k_e i_e A \quad (2.16)$$

où Q_e est le débit (cm^3/s), A la section d'écoulement (cm^2), i_e le gradient électrique (V/cm) et k_e le coefficient de perméabilité électro-osmotique ($\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$). Les valeurs de k_e se situent généralement entre 1×10^{-5} et $1 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ et elles sont relativement indépendantes du type de sol. Les valeurs de k_e sont cependant sensibles à la concentration des électrolytes dans l'eau des pores [MITCHELL, 1976]. LAGEMAN et coll. (1989) soulignent que la mobilité moyenne des ions dans un champ électrique est environ $5 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, soit un ordre de grandeur plus grand que la valeur moyenne de k_e ($5 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$). Pour cette raison, beaucoup d'attention sera portée au phénomène de migration ionique dans un champ électrique. On introduit le sujet en traitant brièvement du phénomène de diffusion.

2.6.1 Diffusion

Le transport par diffusion se fait sous un gradient de concentration et s'exprime par la première loi de Fick en régime permanent:

$$J_x = -D_0 \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.17)$$

où J_x est le flux de masse dans la direction x ($\text{mol}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$) et D_0 le coefficient de diffusion à dilution infinie, ou lorsqu'il n'y a pas d'interaction entre les solutés (cm^2/s). Pour une même surface perpendiculaire à l'écoulement, les solutés se déplacent plus lentement dans les sols que dans une simple solution en raison de la tortuosité du chemin à parcourir. Aussi, on doit tenir compte que les grains de sol et l'air occupent une partie de la section [SHACKELFORD et coll., 1991]. La teneur en eau volumétrique, $\theta = nS_r$, est introduite pour tenir compte de la section réduite, et un facteur de tortuosité apparente (τ_a) est introduit pour tenir compte de la tortuosité mais aussi d'autres facteurs difficiles à évaluer. La première loi de Fick devient alors:

$$J_x = -D_0 \tau_a \theta \frac{\partial c}{\partial x} = -D^* \theta \frac{\partial c}{\partial x} \quad (2.18)$$

où D^* est le coefficient de diffusion apparent (cm^2/s). Il faut cependant faire attention à la définition de D^* employée car certains auteurs incluent θ dans la définition de D^* .

2.6.2 Migration ionique

En supposant que seules les réactions 2.9 et 2.10 se produisent aux électrodes d'une cellule d'électrolyse, le passage d'une mole d'électrons dans le circuit externe entraîne la formation de 1 mole d'ions OH^- à la cathode et de 1 mole d'ions H^+ à l'anode. Le résultat est un déséquilibre des charges de 1 mole à chacune des électrodes. Pour qu'il y ait rééquilibre, une mole d'ions doit circuler dans la cellule (que ce soit des ions positifs, des ions négatifs ou une combinaison des deux). Bien entendu, les réactions d'électrolyse et le déplacement des ions se produisent simultanément pour respecter le principe de l'électroneutralité. BARD et coll. (1983) donnent l'expression unidimensionnelle du flux de masse par migration ($\text{mol}/\text{s}\cdot\text{cm}^2$) pour une espèce j en solution dans une cellule d'électrolyse:

$$J_{xj} = -u_j c_j \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.19)$$

Dans cette formule ϕ est le potentiel électrique (V), c la concentration (mol/cm^3) et u la mobilité ionique ($\text{cm}^2/\text{s}\cdot\text{V}$). u_j est plus précisément la vitesse limite de l'ion j dans un champ électrique unité. La vitesse de l'ion j est donc donnée par:

$$v_{xj} = -u_j \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.20)$$

De la même façon que pour la diffusion, on introduit les facteurs θ et τ_a lorsque l'on parle de la migration dans un sol [ACAR et coll., 1993]. Les expressions 2.19 et 2.20 deviennent:

$$J_{xj} = -u_j^* \theta c_j \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.21)$$

$$v_{xj} = -u_j^* \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.22)$$

avec $u_j^* = u_j \tau_a$. On peut faire le lien entre le coefficient de diffusion et la mobilité ionique pour une espèce j de la façon suivante:

$$u_j = \frac{D_{0j} |z_j| F}{RT} \quad (2.23)$$

où z_j est la valence de l'ion j , F la constante de Faraday, R la constante universelle des gaz (8,31 J/mol·K) et T la température absolue (K).

Tableau 2.3 Coefficients de diffusion et mobilité ionique à dilution infinie

ions	$D_0 \times 10^6$ (cm ² /s)*	$u \times 10^6$ (cm ² /s V)**
chrome (Cr ³⁺)	5,94	695
cuivre (Cu ²⁺)	7,13	556
plomb (Pb ²⁺)	9,25	736
zinc (Zn ²⁺)	7,02	547
sodium (Na ⁺)	13,34	519
calcium (Ca ²⁺)	n.d.	617
H ⁺	93,1	3625
OH ⁻	52,8	2050
acétate (CH ₃ COO ⁻)	10,89	424
nitrate (NO ₃ ⁻)	19,0	740
Cl ⁻	20,3	791
sulfate (SO ₄ ²⁻)	10,6	827

*source: SHACKELFORD, C.D., DANIEL, D.E. (1991) *Diffusion in saturated soil I: Background*, Journal of geotechnical engineering(ASCE), vol. 117, no. 3, p. 467-483.

**source: LIDE, D. R. (1992) *CRC handbook of chemistry and physics*, Boca Raton (États-Unis), 73^e édition, CRC press, pagination multiple.

BARD et coll. (1983) mentionnent que loin des électrodes, les gradients de concentration sont généralement faibles et que la contribution de la migration au courant est largement prépondérante. Aussi, le tableau 2.3 montre qu'à gradient égal le mouvement par migration est beaucoup plus rapide que le mouvement par diffusion.

2.6.3 Nombre de transport

Le courant associé à la migration ionique d'une espèce j est donné par:

$$i_{xj} = -|z_j|FAu_j^* \theta c_j \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad (2.24)$$

Le terme de droite de cette équation est en fait le terme de droite de l'équation 2.21 multiplié par $|z_j|FA$. A est la section totale, z_j la valence de l'ion j et F la constante de Faraday. Ainsi, au sein de la solution, le courant est transporté par les ions en mouvement, chacun contribuant au courant total par la quantité i_j . La fraction du courant total véhiculée par un ion j en un point et un temps donnés est le nombre de transport t_j , dont l'expression mathématique est:

$$t_j = \frac{i_j}{i} = \frac{|z_j|FAu_j^* \theta c_j \frac{\partial \phi}{\partial x}}{\sum_i |z_i|FAu_i^* \theta c_i \frac{\partial \phi}{\partial x}} = \frac{\tau_a FA \theta \frac{\partial \phi}{\partial x} |z_j| u_j c_j}{\tau_a FA \theta \frac{\partial \phi}{\partial x} \sum_i |z_i| u_i c_i} = \frac{|z_j| u_j c_j}{\sum_i |z_i| u_i c_i} \quad (2.25)$$

On conclut de cette dernière équation que le mouvement de masse d'une espèce ionique par rapport aux autres augmente avec sa valence, sa mobilité ionique et sa concentration.

Chapitre 3

Sols testés

Dans le cadre de cette étude, deux sols artificiellement contaminés, les sols d'Ascot et de Coaticook, ainsi que deux sols industriels, les sols 4 et 5, ont subi des traitements par électrocinétique. Des essais de décontamination par électrocinétique ont été effectués par BEAULIEU (1995) et COUTURE (1994) sur le sol d'Ascot alors que le sol de Coaticook a été étudié par COUTURE (1994). Jamais, avant ce projet, des essais de décontamination par électrocinétique ont été conduits sur les sols industriels 4 et 5.

Certaines des caractéristiques des quatre sols en question sont présentées au tableau 3.1, auquel on fera référence tout au long du chapitre. Ce tableau indique aussi que le sol 5 a été obtenu en mélangeant les sols 5A et 5B, provenant du même site mais de profondeurs différentes. La fabrication d'un sol composite a été mise de l'avant pour simuler un contexte de restauration où on ne prendrait pas le soin de séparer les deux couches de sol représentées par les échantillons 5A (0-10cm) et 5B (10-35cm). Les quantités de sol 5A et 5B contenues dans le sol 5 sont à peu près proportionnelles aux quantités trouvées sur le terrain lors d'une exploration sommaire.

Les quatre sols ayant subi des traitements par électrocinétique sont aussi caractérisés par des courbes granulométriques, des analyses au microscope électronique, et des courbes tampons aux sections 3.1, 3.2 et 3.3 respectivement. À la dernière section, on résume les principales caractéristiques des quatre sols, tout en indiquant les conséquences qu'elles devraient avoir sur un traitement électrocinétique.

Tableau 3.1 Caractéristiques générales des sols testés

	Ascot	Coaticook	sol 4	sol 5A	sol 5B	sol 5
description du sol tel que reçu	n.d. ⁽¹⁾	n.d.	n.d.	sol très fin, brun et non cohésif; 0-10cm (prof.)	apparence d'un sable moyen à fin; 10-35cm (prof.); brun	n.a.
manipulations effectuées	n.d. ⁽¹⁾	tamissage sur 5mm	tamissage sur 2,5mm	tamissage sur 2,5mm, séchage partiel et homogénéisation	tamissage sur 2,5mm, séchage partiel et homogénéisation	mélange des sols 5A et 5B
description du sol après manipulations	sable silteux ⁽²⁾ brun	sable silteux ⁽²⁾ brun	sol pratiquement sec constitué de granules dures et friables; gris; pas d'huiles ou débris organiques apparents	sol très fin, brun et non cohésif; 0-10cm (prof.); w=8,9%	apparence d'un sable moyen à fin; 10-35cm (prof.); brun; w=13,4%	le sol 5A constitue 1/3 de la masse de sol sec alors que le sol 5B en constitue 2/3
métaux lourds significatifs	n.a.	n.a.	plomb (env. 14 000ppm) ⁽⁴⁾ (0% soluble (H ₂ O)) zinc (env. 1000ppm) ⁽⁴⁾ (0% soluble (H ₂ O))	chrome plomb	chrome plomb	chrome (7000 à 9000ppm) (1% soluble (H ₂ O)) plomb (environ 2000ppm) (0% soluble (H ₂ O))
teneur en calcium (ppm)	1225 ⁽²⁾	22 292 ⁽³⁾ 23 070 ⁽²⁾	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
pH	5,52 ⁽²⁾ (sol non contaminé)	8,45 ⁽²⁾ (sol non contaminé)	6,8 ⁽³⁾	6,0 ⁽³⁾	5,9 ⁽³⁾	n.d.
coefficient de perméabilité (cm/s)	2x10 ⁻⁴ ⁽²⁾ (sol contaminé)	3,1x10 ⁻⁵ ⁽²⁾ (sol contaminé)	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
teneur en solides volatils (%)	0,8 ⁽²⁾	2,3 ⁽²⁾	n.d.	0,8	2,8	n.d.

⁽¹⁾ un des essais effectués a nécessité 100 litres de sol et la procédure suivie pour l'échantillonnage est décrite au chapitre 4.

⁽²⁾ tiré de: LEFEBVRE, G., COUTURE, C., PAVATE, T.V. (1993) *Efficacité comparative de l'électro-osmose et d'un simple lessivage pour le traitement de sables silteux naturels contaminés au plomb*, Conférence conjointe de la SCGC-ASCE sur le génie environnemental, p. 1419-1426.

⁽³⁾ moyenne de trois échantillons

⁽⁴⁾ donnée très approximative parce que la distribution des métaux est non uniforme dans ce sol.

3.1 Analyses granulométriques

Les courbes granulométriques complètes des sols d'Ascot et de Coaticook ont été présentées dans le mémoire de COUTURE (1994). Ces courbes sont de nouveau présentées sur la figure 3.1 avec celles des sols 4 et 5. L'analyse granulométrique des sols 4 et 5 a été effectuée sur la partie retenue par le tamis de 80 μ m seulement, en respectant les normes BNQ 2560-350 (granulats - détermination par lavage de la quantité de particules passant au tamis de 80 μ m) et BNQ 2560-040 (granulats - analyse granulométrique par tamisage). L'analyse granulométrique de la partie fine n'a pas été faite mais au touché, les sols 4 et 5 ne semblaient pas plastiques. On en conclut que les sols 4 et 5 sont plutôt des sables silteux qu'argileux, tout comme les sols d'Ascot et de Coaticook.

Aucun essai de perméabilité n'a été effectué sur les sols 4 et 5 mais on peut estimer grossièrement leurs coefficients de perméabilité en se servant des courbes granulométriques. En effet, les sols 4 et 5 sont des sables silteux ayant à peu près la même quantité de particules fines que les sols d'Ascot et de Coaticook, et les coefficients de perméabilité des sols 4 et 5 devraient être de l'ordre de 10^{-4} ou 10^{-5} cm/s. À 2×10^{-4} cm/s, le coefficient de perméabilité du sol d'Ascot place ce granulat entre les catégories «faible drainage» et «bon drainage» [HOLTZ et coll., 1981]. Avec un coefficient de perméabilité de $3,1 \times 10^{-5}$ cm/s, le sol de Coaticook se classe dans la catégorie «faible drainage». Le tableau 3.1 précise que les coefficients de perméabilité des sols d'Ascot et de Coaticook ont été déterminés alors que ces sols étaient contaminés. Cette précision est nécessaire puisque le coefficient de perméabilité d'un sol fin peut augmenter lorsque la salinité de l'eau des pores augmente [CASAGRANDE, 1952].

3.2 Analyses au microscope électronique

Des analyses au microscope électronique ont été faites dans le but de connaître et de quantifier les espèces ioniques présentes à la surface des grains de sol. Cependant, cette technique est plutôt qualitative que quantitative. Les figures 3.2, 3.3, 3.4(a) et (b) présentent les spectres des sols d'Ascot, 4, 5A et 5B respectivement. Aucune analyse au microscope

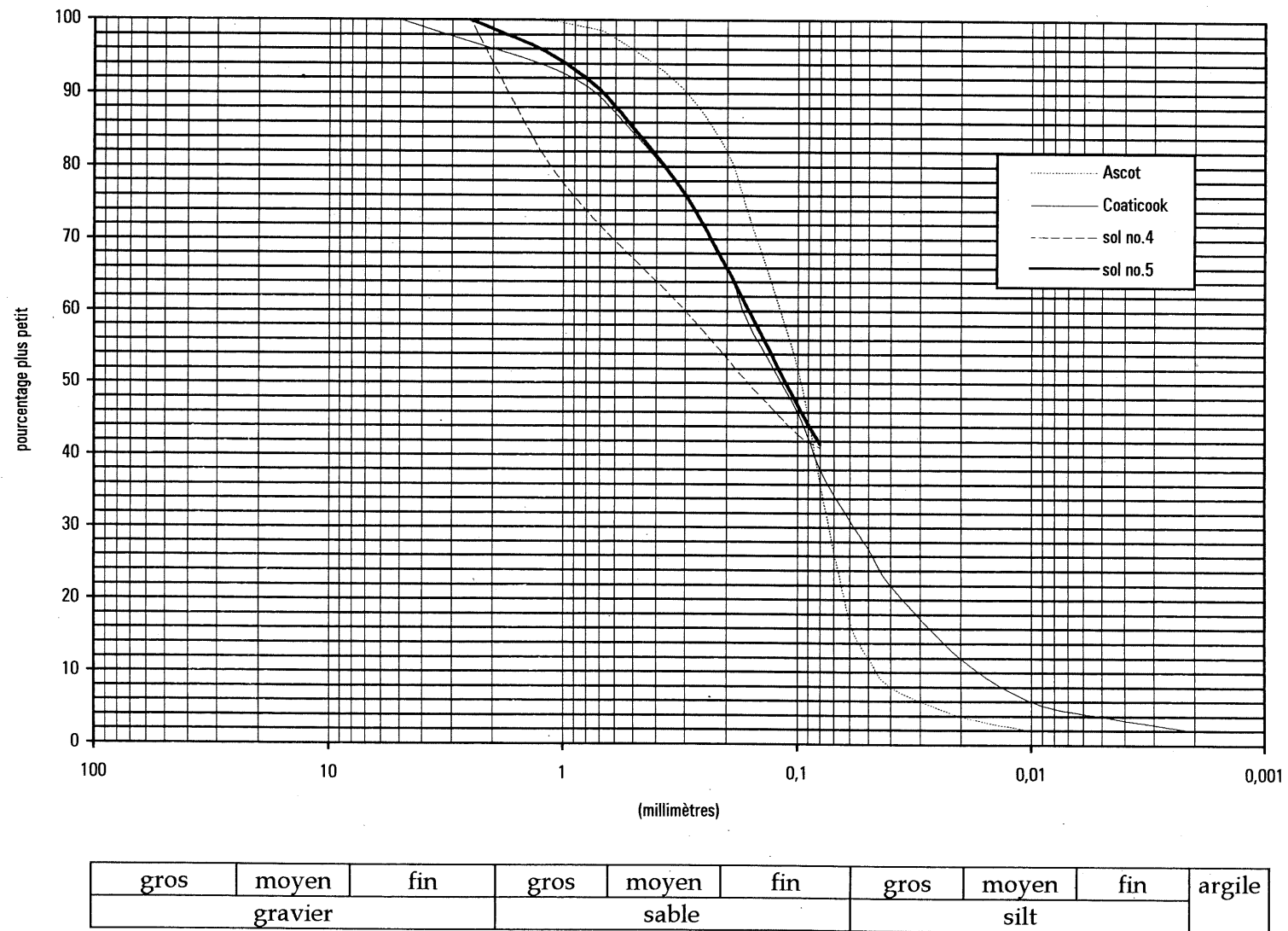


Figure 3.1 Courbes granulométriques des quatre sols testés

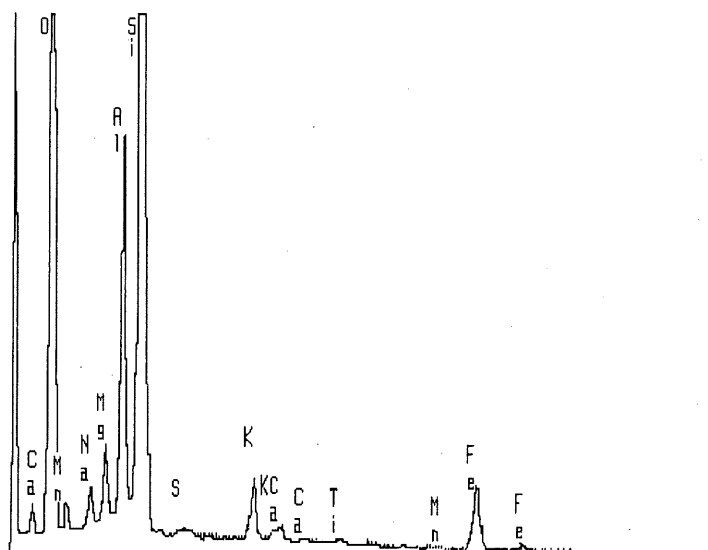


Figure 3.2 Analyse de la surface du sol d'Ascot au microscope électronique

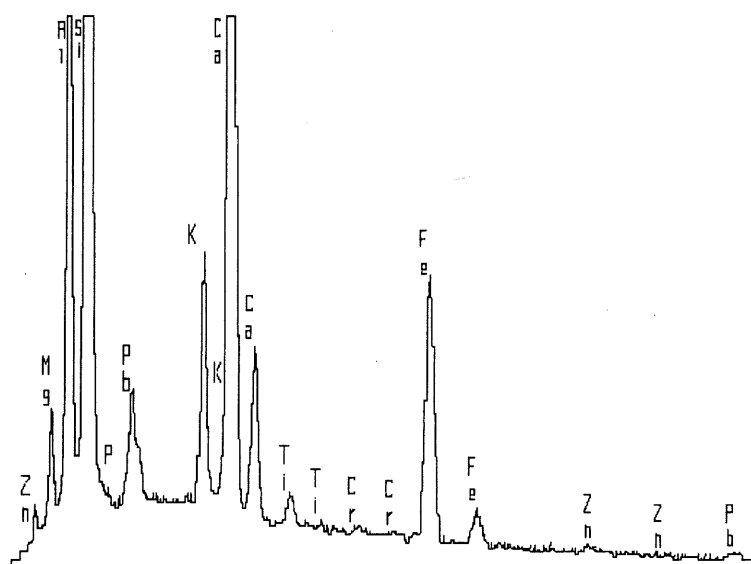
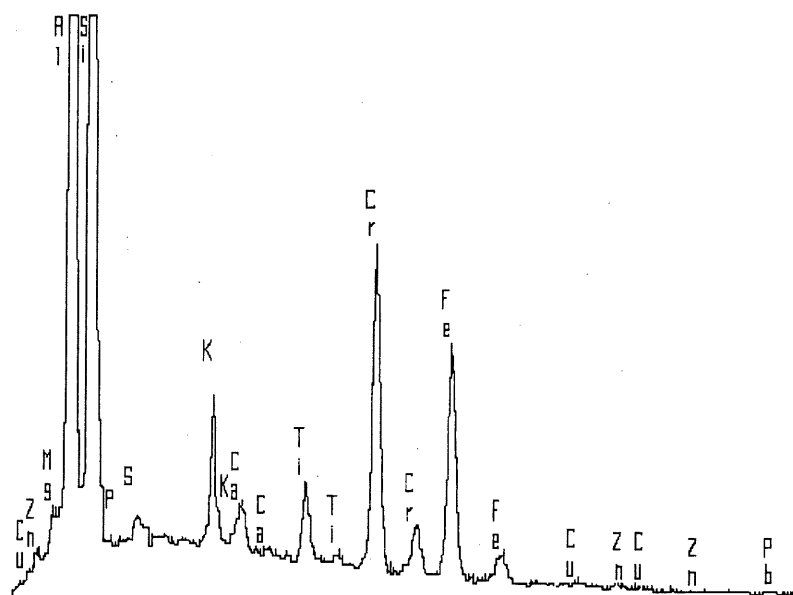
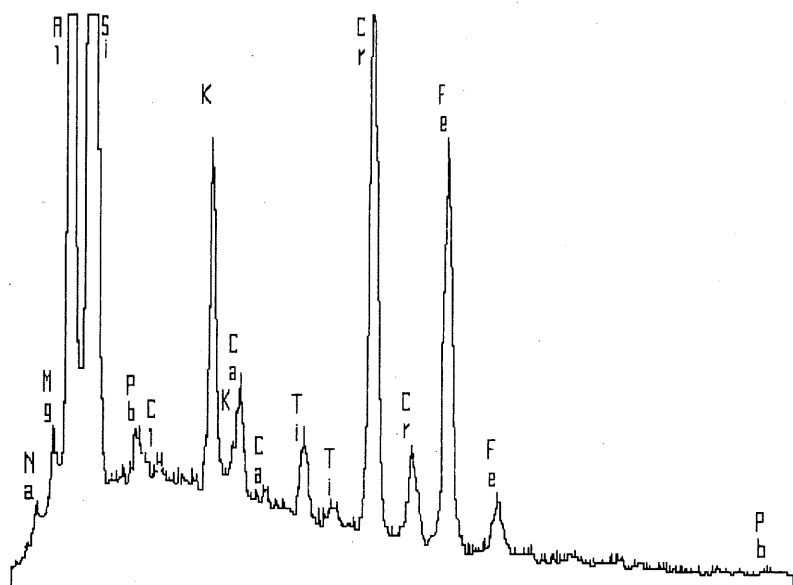


Figure 3.3 Analyse de la surface du sol 4 au microscope électronique



(a)



(b)

Figure 3.4 Analyse de la surface du sol 5A (a) et du sol 5B (b) au microscope électronique

électronique n'a été faite sur le sol de Coaticook dans le cadre de cette recherche. Tous les sols analysés ont sur leur surface du silicium, de l'aluminium, du fer, du potassium, du titane, du magnésium et du calcium. Bien entendu, tous ces sols ont de l'oxygène sur leur surface mais le pic d'oxygène n'apparaît pas sur les spectres sélectionnés des sols 4, 5A et 5B.

3.2.1 Pics de calcium

Mis à part les pics de métaux lourds, l'énorme pic de calcium relatif au sol 4 est la caractéristique qui ressort le plus de l'examen des figures 3.2, 3.3 et 3.4. On sait que la concentration en calcium du sol d'Ascot est d'environ 1200ppm (tableau 3.1) et on peut alors affirmer que le sol 4 a une concentration en calcium supérieure à cette valeur. Par ailleurs, les pics de calcium du sol d'Ascot et des sols 5A et 5B ont à peu près la même amplitude, ce qui permet de dire que la concentration en calcium du sol 5 est voisine de celle du sol d'Ascot.

3.2.2 Comparaison du sol 5 à l'échantillon S49

L'échantillon de sol S49 est l'un des sujets de l'article de PULS et coll. (1994) traitant sur le transport du chrome dans les sols. Une étude a été menée sur cet échantillon de sol et il est intéressant de constater que le spectre (microscope électronique) de l'échantillon S49 est similaire à celui du sol 5. Le spectre en question est présenté à la figure 3.5. Une analyse par diffraction aux rayons X a permis d'identifier les minéraux suivants au sein de l'échantillon S49: le quartz, l'albite, le plagioclase, l'orthoclase et la muscovite (mica). Selon une analyse visuelle le mica ferait aussi partie de la minéralogie du sol 5. Le chrome est présent à une concentration de 4150ppm dans l'échantillon S49, et à 6,1 le pH de l'échantillon S49 est semblable au pH du sol 5 (5,9 - 6,0).

Ces ressemblances qui existent entre les deux sols laissent croire qu'il est possible que les conclusions relatives à l'échantillon S49 s'appliquent au sol 5. Une des conclusions émises par PULS et coll. (1994) vaut particulièrement la peine d'être mise en évidence car elle mentionne sous quelle forme le chrome est présent à la surface de l'échantillon S49. On dit qu'il est presque entièrement sous forme de Cr (III) et qu'il est associé au fer et aux hydroxydes sous la forme d'une phase $\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$. Une technique dont le nom anglais est «time of flight

secondary ion mass spectrometry (SIMS)» a permis d'apporter cette conclusion. Les auteurs mentionnent que la phase $\text{Cr}_x\text{Fe}_{1-x}(\text{OH})_3$ est insoluble et qu'elle est typiquement présente à la surface des grains de feldspaths et de silice.

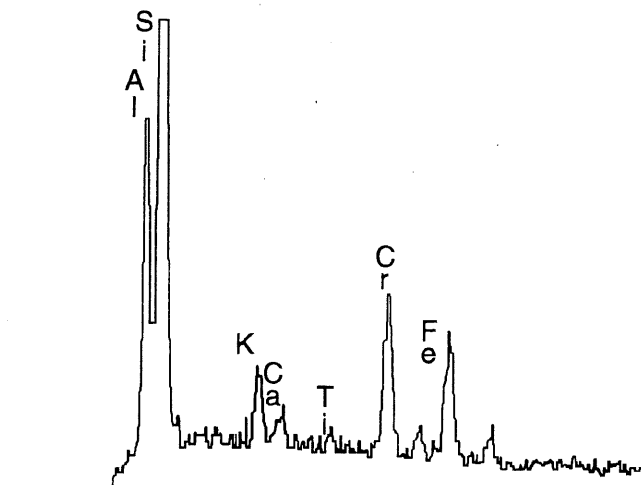


Figure 3.5 Analyse de la surface de l'échantillon S49 au microscope électronique
source: PULS, R.W., CLARK, D.A., PAUL, C., VARDY, J. (1994) *Transport and transformation of Hexavalent chromium through soils and into ground water*, *Journal of soil contamination*, vol. 3, no. 2, p.203-224.

3.3 Essais de capacité tampon

La figure 3.6 présente les résultats des essais de capacité tampon effectués sur les sols d'Ascot, de Coaticook, 4 et 5. Afin de faire une meilleure comparaison avec les sols 4 et 5, les sols d'Ascot et de Coaticook ont été testés lorsque contaminés (environ 5000ppm de plomb et 1500ppm de cuivre). On se rend compte que le sol d'Ascot et le sol 5 possèdent une faible capacité tampon comparativement aux deux autres sols. Cela correspond bien aux teneurs en calcium et en matières organiques relativement faibles des sols 5 et d'Ascot.

La capacité du sol de Coaticook à neutraliser de l'acide est supérieure à celle des sols 5 et d'Ascot. La calcite (CaCO_3) est probablement responsable de cette capacité tampon supérieure parce que le sol de Coaticook contient beaucoup de calcium (concentration de l'ordre de 20

000ppm) et peu de matières organiques. De plus, une réaction effervescente se produit lorsqu'on ajoute de l'acide chlorhydrique au sol, indiquant aussi la présence de calcite [DANA, 1957]. Des quatres sols testés, le sol 4 possède la plus grande capacité tampon. Le pic de calcium observé sur le spectre du microscope électronique et la réaction effervescente (plus forte que dans le cas du sol de Coaticook) se produisant au contact de l'acide chlorhydrique permettent encore une fois d'associer cette grande capacité tampon à la calcite. Probablement que la concentration en calcium du sol 4 est substantiellement plus grande que celle du sol de Coaticook même si on constate que le pH du sol de Coaticook (8,45) est plus élevé que celui du sol 4 (6,8).

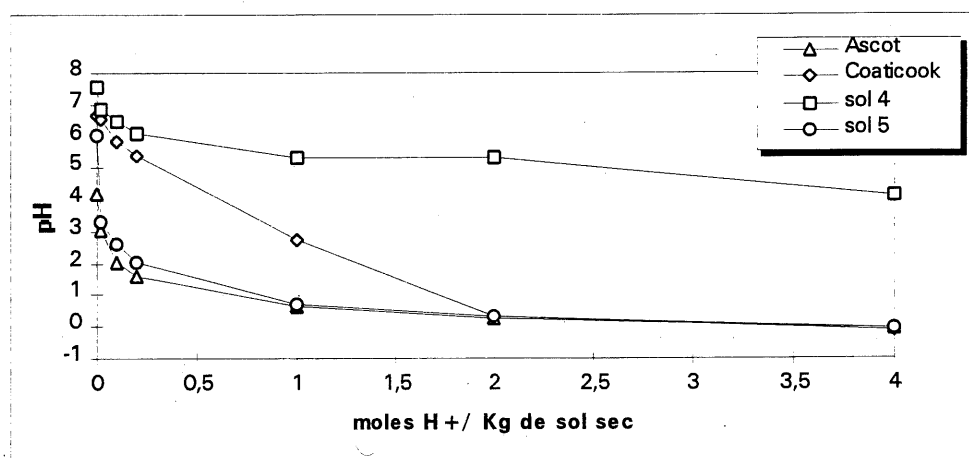


Figure 3.6 Courbes tampons

3.4 Résumé

3.4.1 Sol d'Ascot

Le sol d'Ascot tel que testé est un sable silteux artificiellement contaminé qui contient relativement peu de calcium et peu de matières organiques. La capacité tampon de ce sol est relativement faible et il n'y a donc aucun obstacle majeur à la décontamination de ce sol par électrocinétique.

3.4.2 Sol de Coaticook

Le sol de Coaticook tel que testé est un sable silteux artificiellement contaminé qui, avec 20 000ppm, contient une bonne quantité de calcium et peu de matières organiques. La capacité tampon de ce sol est relativement forte et cela constitue un obstacle à la décontamination par électrocinétique. Les essais effectués par COUTURE (1994) démontrent la difficulté créée par la capacité tampon du sol de Coaticook.

3.4.3 Sol 4

Le sol 4 tel que testé est un sable silteux contaminé principalement au plomb suite à des activités industrielles. Ce sol a une forte capacité tampon possiblement reliée au calcium et elle est plus grande que la capacité du sol de Coaticook. Dans un contexte de décontamination par électrocinétique, le degré de difficulté semble ainsi plus grand pour le sol 4 que pour le sol de Coaticook.

3.4.4 Sol 5

Le sol 5 tel que testé est un sable silteux contaminé principalement au chrome suite à des activités industrielles. Le sol 5 a une capacité tampon non problématique dans un contexte de décontamination puisqu'elle est comparable à celle du sol d'Ascot. Cependant, la présence possible d'une phase insoluble de chrome pourrait être problématique.

Chapitre 4

Procédure expérimentale

Dans le cadre de cette recherche, treize essais de décontamination par électrocinétique ont été réalisés. Le tableau 4.1 regroupe les treize essais identifiés par les lettres CB suivies d'un chiffre allant de un à treize. Pour tous les essais apparaissant dans ce tableau, on retrouve le type de sol utilisé, la nature des contaminants, la nature des fluides de contrôle ainsi que la préacidification employée s'il y a lieu. Il a été nécessaire de diviser le tableau en deux pour faire la distinction entre deux grands groupes d'essais.

Les essais CB1 à CB7 font partie d'un groupe dans lequel le sol utilisé était du silt d'Ascot artificiellement contaminé. Le but premier de ces sept essais n'était pas la décontamination puisque BEAULIEU (1995) et COUTURE (1994) ont déjà démontré qu'il était possible de décontaminer adéquatement le sol d'Ascot. Les objectifs principaux de ce groupe étaient plutôt reliés à la préparation et à la réalisation de l'essai CB7 en cellule de 100 litres. Par opposition au premier groupe, la philosophie entourant les essais CB8 à CB13 était plutôt axée sur la décontamination. C'est pourquoi dans la colonne de droite du demi-tableau inférieur on parle de stratégie plutôt que d'objectif.

Le présent chapitre est divisé en six grandes sections où on explique, dans l'ordre, les procédures expérimentales reliées aux essais en cellule de 1 litre, à l'essai en cellule de 100 litres, à l'analyse des échantillons de sol, à l'analyse des accessoires de la cellule de 1 litre, à l'analyse des échantillons de fluide, et aux tests de préacidification.

Tableau 4.1 Programme expérimental

essai	sol	contaminant(s) principal(aux)	acide de contrôle à la cathode	solution de contrôle à l'anode	préacidification	objectif(s) principal(aux)
CB1	Ascot	zinc	CH ₃ COOH 0,87M	CH ₃ COOH 0,87M	aucune	étude du comportement du zinc
CB2	Ascot	zinc	CH ₃ COOH 0,87M	CH ₃ COOH 0,87M	aucune	effet de la recirculation du catholyte
CB3	Ascot	zinc	CH ₃ COOH 0,87M	CH ₃ COOH 0,87M	aucune	effet: cathode étroite (25mm) et géotextiles
CB4	Ascot	zinc	CH ₃ COOH 0,87M	CH ₃ COOH 0,87M	aucune	effet de l'homogénéisation du catholyte ; effet du nombre de charges
CB5	Ascot	cuivre ; plomb	CH ₃ COOH 0,87M	CH ₃ COOH 0,87M	aucune	effet d'échelle volume de sol = 1 litre
CB6	Ascot	cuivre ; plomb	CH ₃ COOH 0,87M	CH ₃ COOH 0,87M	aucune	effet de la teneur en eau initiale ; effet du nombre de charges
CB7	Ascot	cuivre ; plomb	CH ₃ COOH 0,87M	CH ₃ COOH 0,87M	aucune	effet d'échelle volume de sol = 100 litres
essai	sol	contaminants principaux	acide de contrôle à la cathode	solution de contrôle à l'anode	préacidification	stratégie de décontamination
CB8	sol 4	plomb ; zinc	CH ₃ COOH 0,87M	H ₂ O	HCl 2,51 moles H ⁺ /Kg sol sec	très forte préacidification ; acidification en cours de traitement
CB12	Coaticook	cuivre ; plomb	CH ₃ COOH 0,87M	NaOAc 1M (H ₂ O) (CaOAc 0,5M)	CH ₃ COOH 0,16 mole H ⁺ /Kg sol sec	légère préacidification (acide faible) ; extraction des métaux avec NaOAc
CB9	sol 5	chrome ; plomb	CH ₃ COOH 0,87M	H ₂ O	HCl 0,87 mole H ⁺ /Kg sol sec	forte préacidification ; acidification en cours de traitement
CB10	sol 5	chrome ; plomb	CH ₃ COOH 0,87M	H ₂ O	HNO ₃ 0,87 mole H ⁺ /Kg sol sec	forte préacidification ; acidification en cours de traitement
CB11	sol 5	chrome ; plomb	HCl 1 M	H ₂ O	HCl 0,87 mole H ⁺ /Kg sol sec	forte préacidification ; acidification en cours de traitement
CB13	sol 5	chrome ; plomb	CH ₃ COOH 0,87M	H ₂ O	CH ₃ COOH 0,34 mole H ⁺ /Kg sol sec	légère préacidification (acide faible) ; acidification en cours de traitement

4.1 Essais en cellule de 1 litre

4.1.1 Description du montage

La figure 4.1 est un schéma montrant une vue d'ensemble du montage utilisé lors des douze essais réalisés en cellule de 1 litre. La cellule de 1 litre, décrite en détail par la figure 4.2, est alimentée par une source de courant continu. La source, de modèle GPR-6030 (Goodwill instrument co.), permet d'appliquer un courant constant ou une différence de potentiel constante. La capacité de l'appareil est de 62 volts et 3 ampères. Une burette graduée (0 à 250ml) fournit la solution de contrôle au réservoir anodique. Cette burette a été conçue de façon à fournir une quantité de solution égale à celle s'écoulant dans le sol lorsqu'un débit électro-osmotique existe de l'anode vers la cathode. Lorsqu'un débit électro-osmotique existe de la cathode vers l'anode, le fluide arrivant à l'anode est recueilli dans un cylindre gradué ou un autre contenant via un déversoir. L'acide de contrôle est amené dans le réservoir cathodique par une pompe péristaltique Masterflex L/S de modèle 7553-80 (Cole-Parmer instrument co.). Le fluide récupéré via le déversoir est stocké dans un contenant ou recirculé dans le réservoir cathodique. Cependant, avant de recirculer, le fluide de sortie doit être reconditionné par de l'acide.

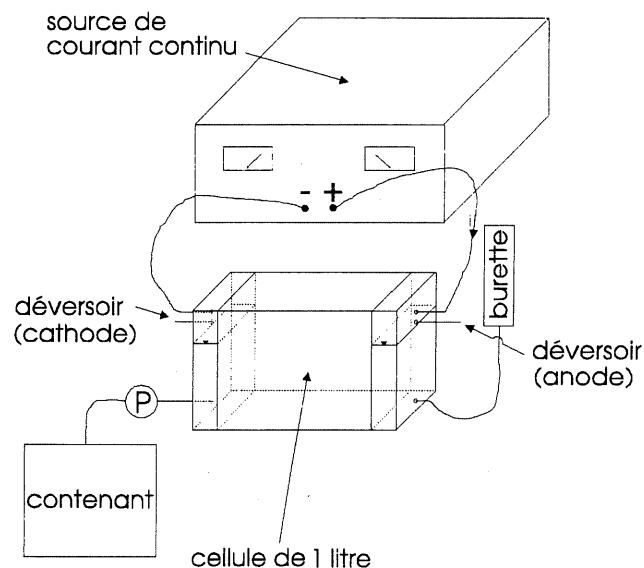
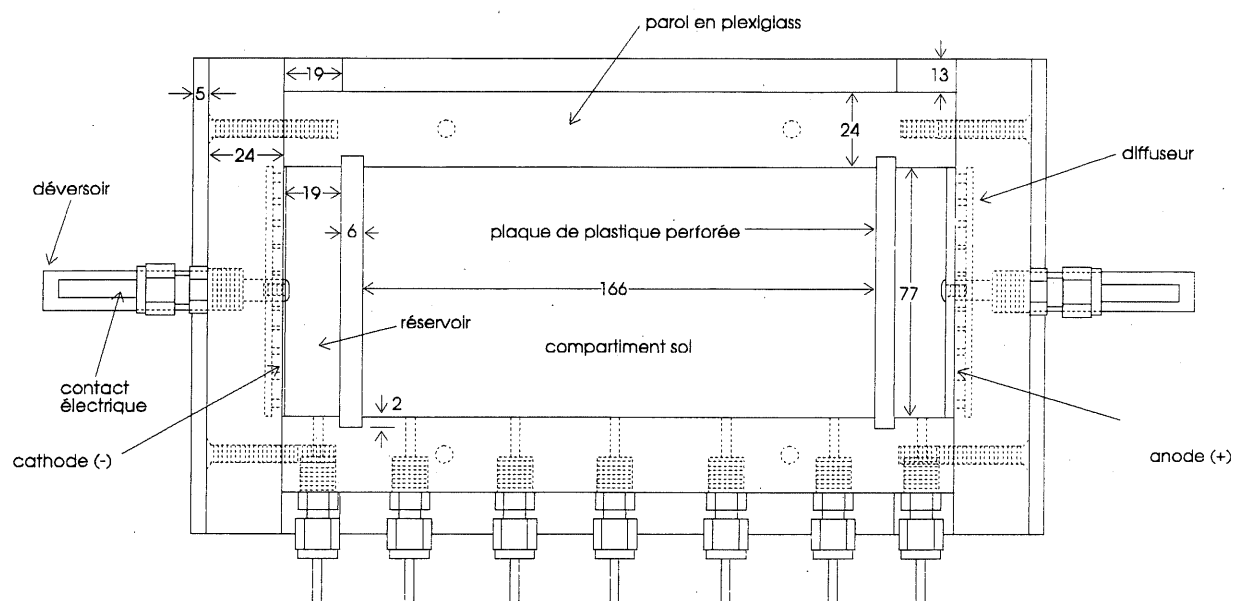


Figure 4.1 Schéma du montage utilisé

Vue en plan (cotes en millimètres)



Vue en élévation (cotes en millimètres)

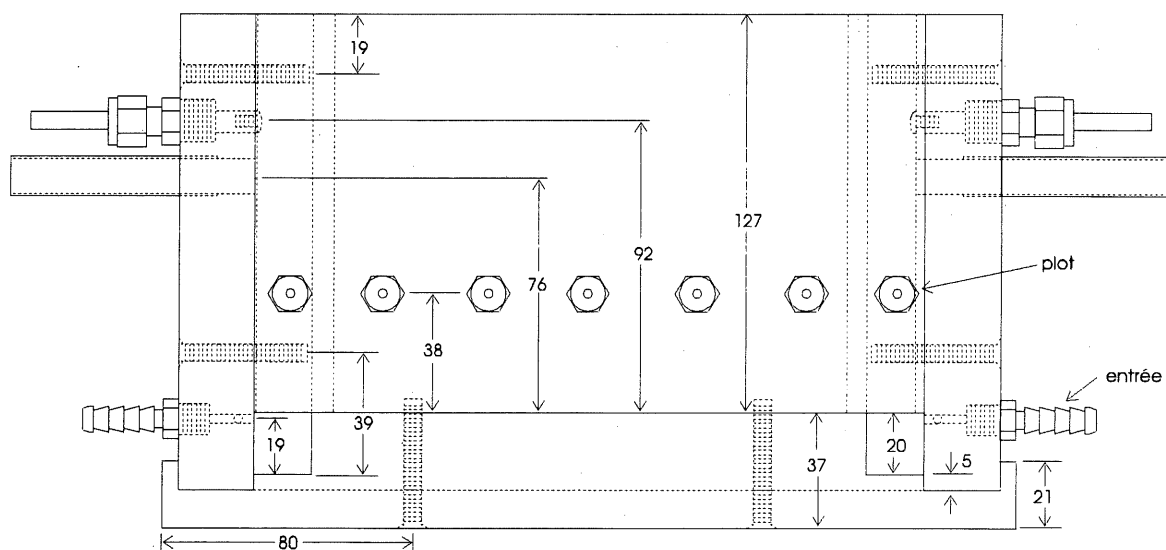


Figure 4.2 Plan détaillé de la cellule de 1 litre

La cellule de 1 litre est décrite en détail à l'aide d'un plan montrant des vues en plan et en élévation (figure 4.2). Il faut noter que cinq ou six cellules de 1 litre ont été construites et que les dimensions apparaissant sur la figure 4.2 peuvent varier légèrement d'une cellule à l'autre. Notamment, deux cellules ont été munies de réservoirs plus épais afin d'effectuer plus facilement certaines opérations.

La base ainsi que les parois de la cellule sont en plexiglass pour permettre l'observation des phénomènes se produisant dans le sol et les réservoirs. Ces pièces sont assemblées à l'aide de vis et l'étanchéité du tout est assurée par un joint de silicone. Les déversoirs sont en plastique et sont collés aux parois latérales. Ils sont au même niveau pour qu'il n'y ait pas de gradient hydraulique. Les contacts électriques ainsi que les plots servant à la mesure des différences de potentiel sont en acier inoxydable. Les connexions permettant l'entrée des fluides de contrôle dans les réservoirs ainsi que la cathode sont aussi en acier inoxydable. L'anode est en carbone et a une épaisseur d'environ 3mm mais il faut mentionner que des anodes de 6mm ont été utilisées lors des essais CB8 à CB13. Pour ces essais, on voulait assurer une meilleure répartition du potentiel à la surface de l'anode.

Le détail des plaques de plastique perforées n'apparaît pas sur la figure 4.2. Ces plaques amovibles comportent environ 50 trous ayant 8mm de diamètre et elles ont pour fonction de soutenir le sol tout en laissant passer un liquide. La raison d'un si grand nombre de trous est que l'on veut minimiser la chute de potentiel au travers des plaques. Le diamètre des trous est assez grand pour empêcher l'obstruction de ces derniers par des bulles d'air. Selon le cas, des papiers filtres ou des géotextiles sont utilisés pour empêcher le sol de se déverser dans les réservoirs. Des diffuseurs ont été forés à même les parois des réservoirs afin de distribuer uniformément les fluides de contrôle entrant.

4.1.2 Préparation du sol et des fluides de contrôle

Trois procédures ont été suivies pour préparer les sols aux essais de décontamination par électrocinétique:

A) Essais CB1 à CB6 (sol d'Ascot artificiellement contaminé):

- Assèchement du sol non contaminé dans une étuve ventilée.
- Calcul de la quantité de sel requise pour contaminer 2,1Kg de sol sec à la concentration voulue. Le zinc est introduit sous forme de sulfate alors que le plomb et le cuivre sont introduits sous forme de nitrates. Les sels sont mélangés à une quantité d'eau distillée correspondant à la teneur en eau visée, et la solution contaminante est prête.
- La solution contaminante est mélangée au sol sec dans un plat de plastique. Le sol contaminé séjournera au moins 24 heures dans une chambre humide avant d'être traité.

B) Essai CB12 (sol de Coaticook artificiellement contaminé):

- Assèchement du sol non contaminé dans une étuve ventilée.
- Calcul de la quantité de sel requise pour contaminer 3,0Kg de sol sec à la concentration voulue. Le plomb et le cuivre sont introduits sous forme de nitrates. Les sels sont mélangés à une quantité d'eau distillée correspondant à une teneur en eau assez élevée pour permettre l'obtention d'une boue lors du mélange de cette solution avec le sol sec.
- La solution contaminante est mélangée au sol sec dans un plat de céramique. Le sol contaminé est séché dans une étuve ventilée.
- Une quantité d'acide acétique correspondant à la teneur en eau visée est ajoutée au sol contaminé et le mélange se fait dans un plat de plastique. La concentration de l'acide est fonction de la quantité d'ions H^+ que l'on veut introduire par kilogramme de sol sec. Le sol contaminé et préacidifié a séjourné 24 heures dans le plat de plastique (fermé) avant d'être traité.

C) Essais CB8 à CB11 et essai CB13 (sols industriels):

- Une quantité d'acide correspondant à la teneur en eau visée est ajoutée au sol contaminé et le mélange se fait dans un plat de plastique. La concentration de l'acide est fonction de la quantité d'ions H^+ que l'on veut introduire par kilogramme de sol sec. Le sol contaminé et préacidifié séjournera au moins 24 heures dans le plat de plastique (fermé) avant d'être traité.

Tous les acides de contrôle ont été obtenus à partir d'acides concentrés et d'eau distillée. Les acétates de sodium et de calcium (essai CB12) ont été préparés à partir de sels et d'eau distillée. Sauf pour l'essai CB12 où on a utilisé de l'eau du robinet, l'eau de contrôle à l'anode était de l'eau distillée.

4.1.3 Mise en place du sol

Généralement, le sol a été placé à une teneur en eau plus grande que l'optimum. Cette affirmation n'est pas faite sur la base d'un essai Proctor mais parce que le sol faisait un «ventre de boeuf» lorsqu'on voulait le compacter avec un pilon. Dans les cas où le «ventre de boeuf» était trop prononcé on a mis le sol en place en vibrant légèrement la cellule. Seul le sol de l'essai CB1 a laissé place à une bonne compaction effectuée à l'aide d'un pilon d'acier. Durant la mise en place de tous les essais, trois échantillons de sol ont été prélevés pour des analyses subséquentes.

4.1.4 Contrôles et mesures durant les essais

Le maintien d'un pH adéquat dans le réservoir cathodique était le contrôle le plus important à faire lors d'un essai. Ce travail s'effectuait en utilisant un acide de contrôle ayant une concentration convenable et en variant le débit de la pompe péristaltique au besoin. Le maintien d'un pH voisin de 3 à l'aide d'un acide fort était une tâche particulièrement ardue. La réalisation de l'essai CB12 a de plus nécessité le contrôle du pH dans le réservoir anodique. Cette opération s'est effectuée à l'aide d'un «compte goutte» semblable à ceux utilisés en médecine pour administrer du sérum. Des contrôles de routine étaient aussi à faire comme la vérification de la tuyauterie, la vérification des fuites, etc...

Environ deux ou trois fois par jour une série de mesures devait être prise lors d'un essai de décontamination. Les mesures du courant et des différences de potentiel entre chacun des plots étaient faites à l'aide d'un multimètre de modèle 23 series II (Fluke). Les niveaux de liquide dans la burette et le contenant de récupération à l'anode étaient aussi pris en note. Finalement, la mesure du pH dans les réservoirs cathodique et anodique pouvait aussi être faite.

4.1.5 Prise d'échantillons en cours d'essai

Au cours des essais CB8 et suivants, des échantillons de sol ont été recueillis afin de mieux comprendre le comportement des métaux lourds, mais aussi afin de faire le point et réagir. La figure 4.3 montre le bloc de sol contenu par la cellule, ainsi que l'emplacement des trois échantillons généralement retirés lors d'un échantillonnage en cours de traitement. Un échantillon était prélevé en plein centre du bloc alors que les deux autres étaient prélevés près de la cathode et de l'anode. L'échantillonnage se faisait à l'aide d'une petite spatule en acier inoxydable et cette manoeuvre laissait un trou d'environ 4cm de profondeur, qui finissait par se refermer sur lui-même. Dans les réservoirs ou bien les contenants de récupération, les échantillons de liquide ont été recueillis par une pipette et ont été conservés hermétiquement dans des bouteilles de plastique. Il est important de souligner que les échantillons de liquide ont été gardés à la noirceur et à 4°C avant d'être analysés le plus tôt possible.

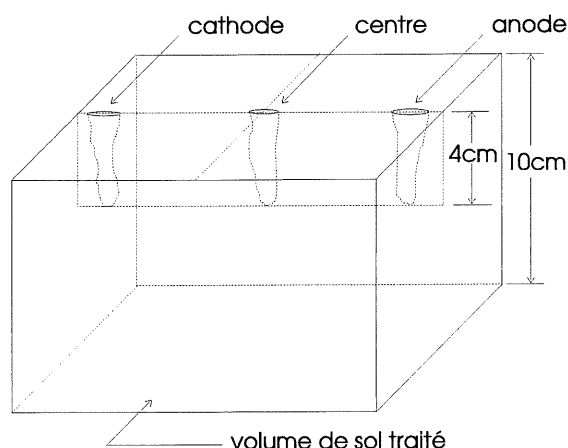


Figure 4.3 Échantillonnage du sol en cours d'essai: cellule de 1 litre

4.1.6 Prise d'échantillons et autres procédures en fin d'essai

La première étape à réaliser lorsqu'un essai était terminé était de faire la vidange des liquides contenus dans les réservoirs cathodique et anodique. On regroupait dans un b cher le fluide de vidange anodique, le fluide contenu dans la burette ainsi que le fluide du contenant de récupération à l'anode. Dans un autre b cher, on regroupait le fluide de vidange cathodique ainsi que le fluide du contenant de récupération à la cathode.

En second lieu, on d montait la paroi    était située l'anode tout en prenant soin de récupérer séparément l'anode, la plaque de plastique ainsi que le géotextile ou le papier filtre dans trois b chers. Troisièmement, on prélevait seize échantillons de sol issus des seize tranches montrées à la figure 4.4. Les tranches étaient recueillies de l'anode vers la cathode, chacune d'elles étant découpée à l'aide d'une spatule en acier inoxydable. Une fois découpée, une tranche était déposée sur une pellicule de plastique pour y être homogénéisée. On prélevait ensuite une certaine quantité de sol, ce qui constituait un échantillon représentatif de la tranche. Une fois que les seize échantillons de sol étaient prélevés, on prenait soin de récupérer la cathode, la plaque de plastique ainsi que le géotextile ou le papier filtre dans trois b chers.

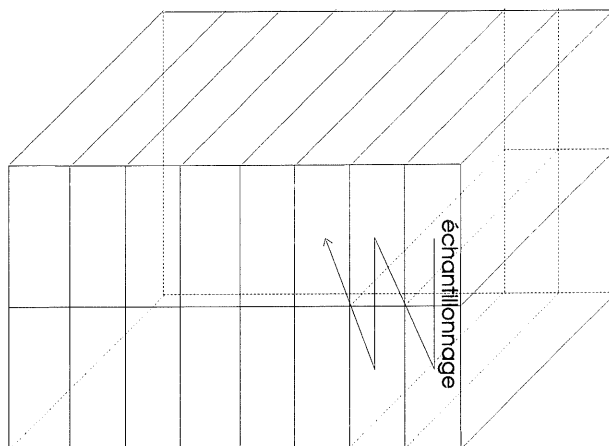


Figure 4.4 Division du sol traité en seize tranches et échantillonnage en fin d'essai

4.2 Essai en cellule de 100 litres

4.2.1 Description du montage

Le principe du montage utilisé pour réaliser l'essai CB7 est le même que celui du montage présenté à la figure 4.1. La pompe péristaltique ainsi que la source de courant employées lors des essais en cellule de 1 litre ont aussi été employées pour l'essai CB7. La figure 4.5 montre une photo de l'essai CB7 en opération. On remarque que chacun des réservoirs est muni d'un mélangeur et que deux burettes de 250ml, branchées en parallèle, fournissent le réservoir anodique (à droite). L'appareil à gauche de la cellule est la pompe péristaltique.

La figure 4.6 est un plan montrant des vues en plan et en élévation de la cellule de 100 litres. Seule la paroi frontale de la cellule est en plexiglass étant donné le coût élevé de ce matériau. Les autres parois sont faites d'une matière plastique opaque. Les déversoirs, les contacts électriques, les connexions permettant l'entrée des fluides, et les plots ont les mêmes caractéristiques que les éléments de la cellule de 1 litre, sauf que la cellule de 100 litres comporte deux plots supplémentaires. La cathode et l'anode ont été fabriquées à partir des mêmes matériaux que ceux utilisés pour les électrodes de la cellule de 1 litre. Cependant, au-lieu d'être une plaque, l'anode consiste en deux électrodes semi-circulaires reliées en parallèle. La séparation entre le sol et les réservoirs est assurée par un grillage de plastique et un géotextile. Le grillage de plastique est fait de deux feuilles de grillage à fluorescents collées, et est aussi muni de renforts. Les diffuseurs anodique et cathodique sont externes (figure 4.6) au-lieu d'être forés à même les parois. Chacun des diffuseurs a été construit à partir de deux tuyaux de plastique collés, le long tuyau étant percé pour permettre la répartition uniforme des fluides d'entrée. La figure 4.5 permet d'apercevoir l'extrémité du diffuseur anodique juste au-dessus du fond du réservoir. Une pente, qui descend vers l'avant de la cellule, existe au fond de chacun des réservoirs pour permettre le drainage complet des fluides en fin d'essai. On voit, sur la figure 4.5, les deux drains situés au bas des réservoirs et sur la face avant de la cellule.

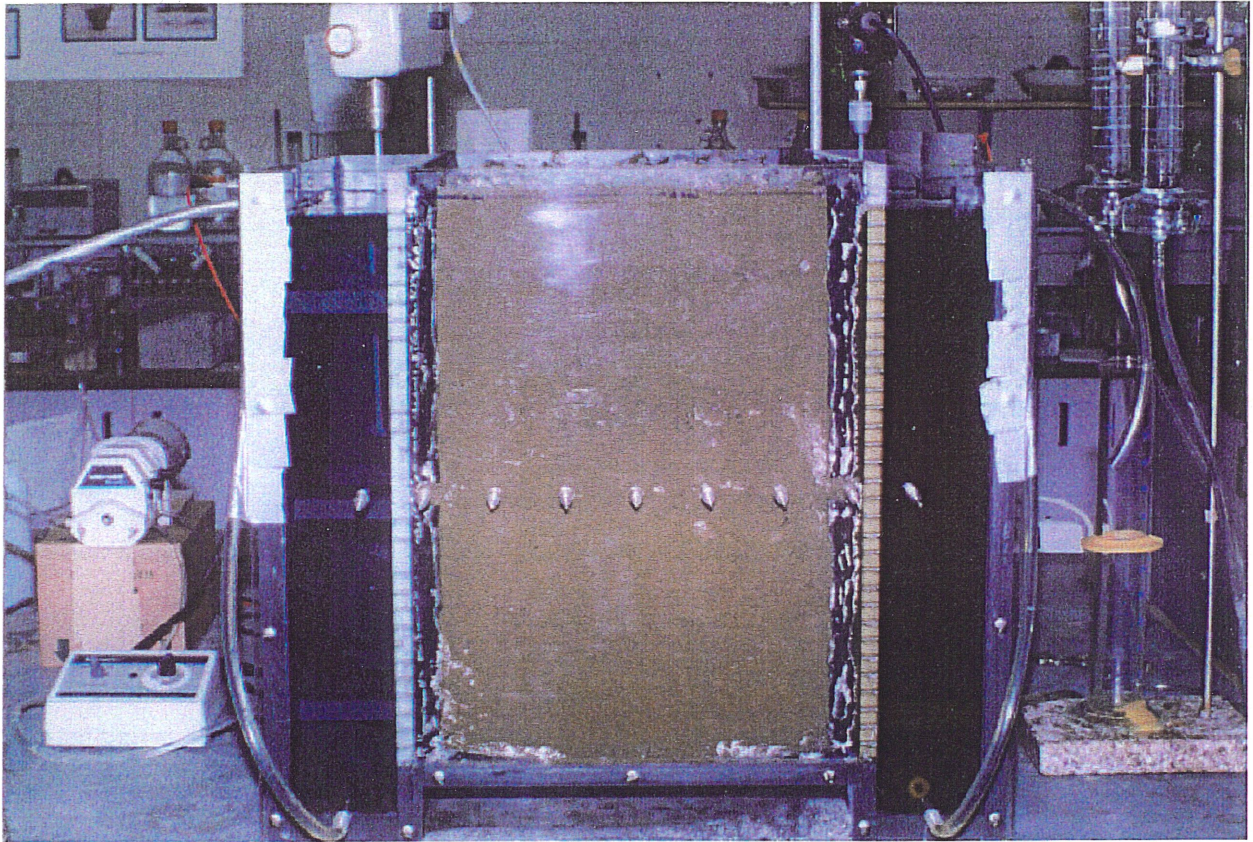
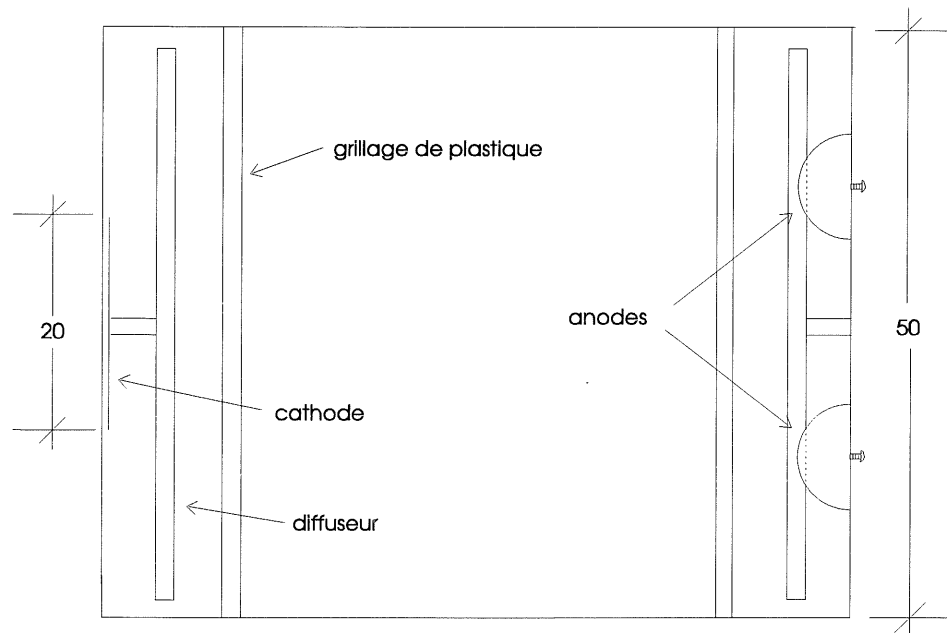


Figure 4.5 Photographie de l'essai en cellule de 100 litres

Vue en plan (cotes en centimètres)



Vue en élévation (cotes en centimètres)

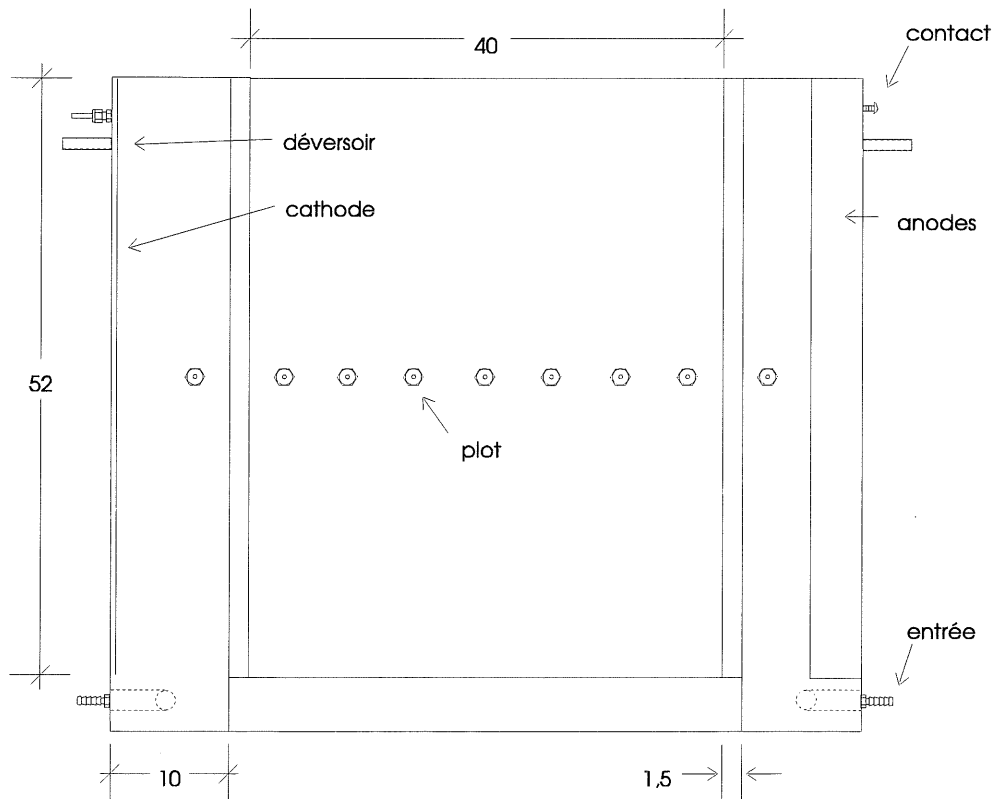


Figure 4.6 Plan de la cellule de 100 litres

4.2.2 Préparation du sol et des fluides de contrôle

On a dû se procurer une grande quantité de sol pour la réalisation de l'essai CB7. Le sol a été échantillonné au même site que le sol des essais CB1 à CB6, et seul le sol provenant de lentilles silteuses a été récupéré. La teneur en eau du sol ainsi échantillonné était d'environ 22%. Afin d'introduire les nitrates de plomb et de cuivre sous forme liquide, et ce sans se retrouver avec une boue, la teneur en eau a dû être abaissée à environ 6%. La quantité de sol requise a été étendue sur une pellicule de plastique et le séchage a été accéléré à l'aide d'un ventilateur. La quantité de sel requise pour contaminer 250Kg de sol sec a été mélangée à une quantité d'eau du robinet correspondant à la teneur en eau visée. La solution contaminante a été mélangée au sol ($w \approx 6\%$) dans un grand bac de plastique. Une fois homogénéisé, le sol contaminé a été entreposé quelques jours dans des sacs de plastique fermés hermétiquement. Les fluides de contrôle à l'anode et à la cathode ont été préparés à partir d'acide acétique concentré et d'eau du robinet.

4.2.3 Mise en place du sol

Le sol a été mis en place à l'aide d'un pilon constitué d'une plaque d'acier soudée à une tige massive. Les premières couches se sont bien compacté mais on a dû travailler plus doucement à mesure que la mise en place progressait. En effet, déjà à mi-hauteur le sol faisait un «ventre de boeuf» et de plus, les grillages de plastique semblaient à la limite de leur résistance. Afin de minimiser la pression à la base des grillages, les réservoirs ont été remplis à mesure que le niveau du sol s'élevait. Durant la mise en place, trois échantillons de sol ont été prélevés pour des analyses futures. Étant donné le grand volume de sol, les échantillons ont été obtenus suite à deux quartages effectués sur environ 3Kg de sol.

4.2.4 Contrôles et mesures durant l'essai

Le contrôle du pH à la cathode s'est fait de la même façon que pour les essais en cellule de 1 litre, et les mêmes contrôles de routine ont été effectués. Le plomb et le cuivre sous forme solide s'est accumulé à grand rythme dans le réservoir cathodique, et à certains moments, il fallait retirer une partie du dépôt pour empêcher la formation d'un pont entre la cathode et le

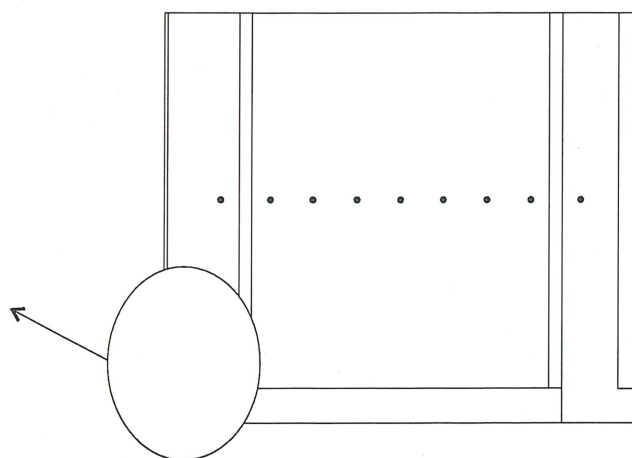
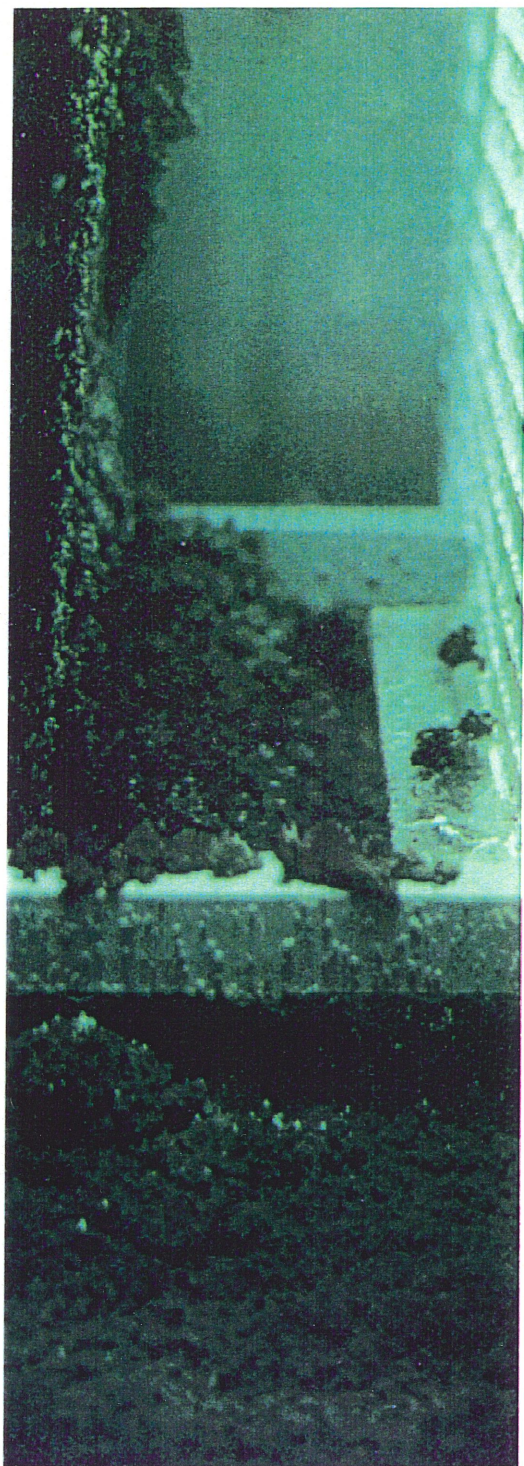


Figure 4.7 Photographie du dépôt de plomb et de cuivre formé à la cathode: cellule de 100 litres

sol. Un tel pont aurait permis l'électrodéposition du plomb et du cuivre à même le sol. La figure 4.7 montre une photo du réservoir cathodique durant l'essai, et permet d'apprécier l'ampleur du dépôt de plomb et de cuivre. Les mesures décrites à la section 4.1.4 ont aussi été faites durant l'essai CB7, avec en plus la mesure de la température. Celle-ci a été mesurée à l'aide d'une sonde insérée en plein centre de la masse de sol.

4.2.5 Prise d'échantillons en cours d'essai

Afin d'analyser plus en détail le phénomène de la migration ionique, sept échantillons de sol ont été prélevés au cours de l'essai CB7. La disposition des échantillons est montrée à la figure 4.8 (a). L'échantillonnage s'est fait à l'aide d'une spatule en acier inoxydable et sur une profondeur de 5 à 10cm. Plus tard au cours de l'essai, deux carottes de sol ont été extraites à l'aide d'un tube à paroi mince en acier inoxydable. Les carottes avaient un diamètre d'environ 5mm et étaient disposées comme sur la figure 4.8 (b). Cette figure montre que les deux trous laissés par l'échantillonnage occupaient toute l'épaisseur de la masse de sol. En réalité, les carottes récupérées n'avaient que 21cm de longueur. Chacune des carottes a été coupée en trois tronçons de 7cm constituant les sous-échantillons bas, centre, et haut. Les échantillons de liquide ont été recueillis et conservés suivant la procédure décrite à la section 4.1.5.

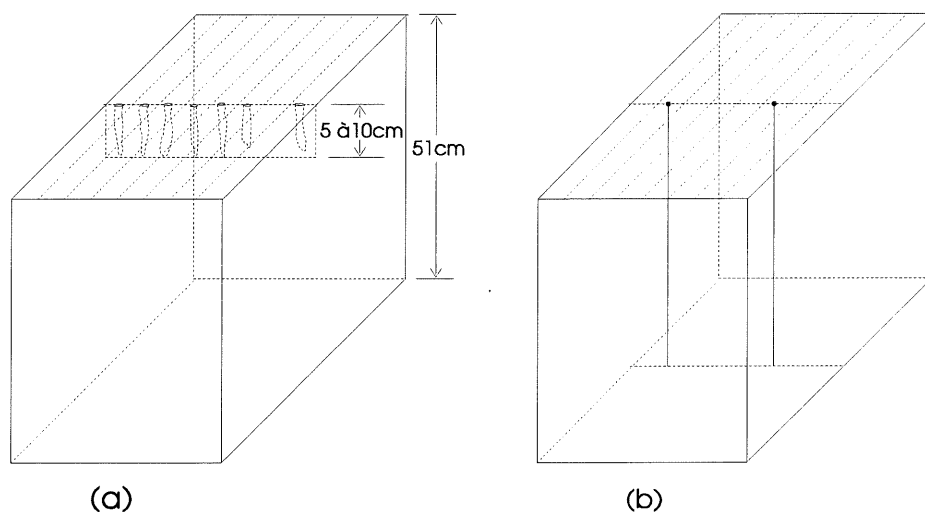


Figure 4.8 Échantillonnage du sol en cours d'essai: cellule de 100 litres

4.2.6 Prise d'échantillons et autres procédures en fin d'essai

En fin d'essai, le sol traité a été séparé en seize sections similaires à celles de la figure 4.4. Cependant, la cellule de 100 litres ne se démonte pas pièce par pièce comme la cellule de 1 litre, et il a fallu procéder de la façon suivante:

- Vidange des réservoirs jusqu'à ce que leur niveau soit sous la mi-hauteur du volume de sol traité.
- Échantillonnage, de l'anode vers la cathode, dans les huit sections supérieures. Un échantillon de sol est le résultat du mélange des trois carottes montrées sur la figure 4.9(a), et d'un quartage. Les carottes de sol ont été obtenues après avoir enfoncé un cylindre d'acier ayant un diamètre intérieur d'environ 2,5cm.
- Excavation jusqu'à une profondeur de 12,5cm et prise d'onze échantillons ponctuels à l'aide d'une spatule en acier inoxydable. Le sol a été échantillonné sur un plan horizontal, comme on peut le voir sur la figure 4.9(b)
- Excavation jusqu'à la mi-hauteur du volume de sol.
- Vidange totale des réservoirs.
- Échantillonnage, de l'anode vers la cathode, dans les huit sections inférieures.
- Excavation jusqu'à 12,5cm de la base et prise d'onze échantillons ponctuels à l'aide d'une spatule en acier inoxydable. Le sol a été échantillonné sur un autre plan horizontal, comme on peut le voir sur la figure 4.9(b)

Tous les fluides, la cathode, l'anode, les géotextiles et les grillages de plastiques n'ont pas été analysés étant donné les grandes dimensions et les grands volumes impliqués.

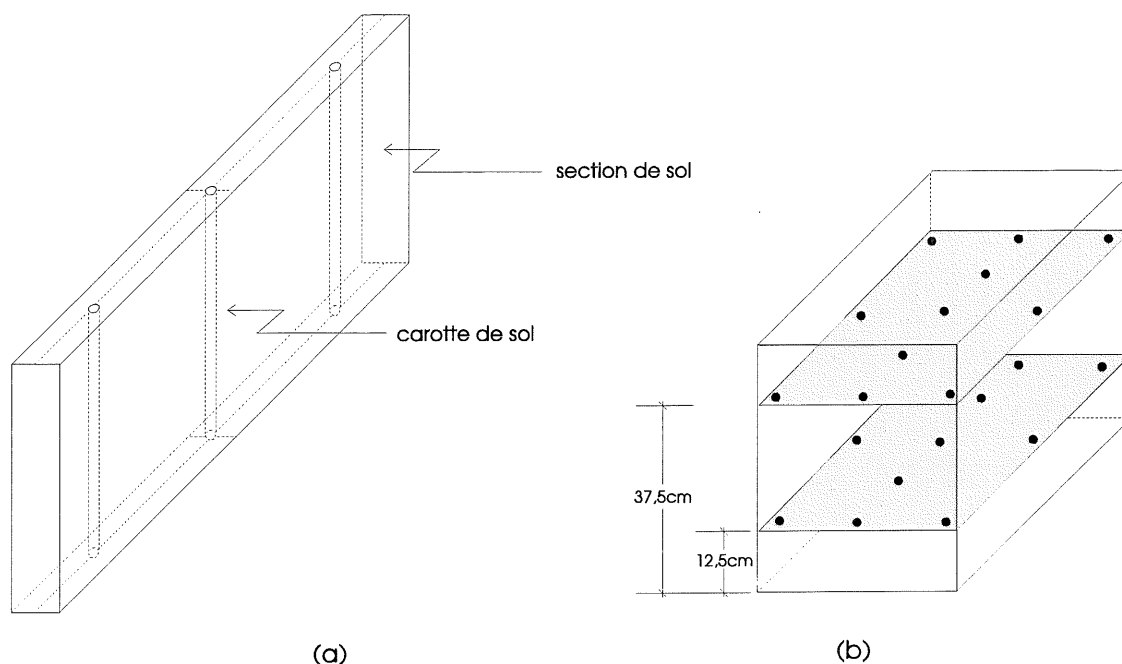


Figure 4.9 Échantillonnage dans chacune des sections(a) et sur deux plans horizontaux(b)

4.3 Analyse des échantillons de sol

Généralement, les échantillons de sol provenant des essais CB1 à CB13 avaient une masse variant entre 40 et 80g. Les huit échantillons provenant du bas de la masse de sol traité étaient divisés en deux sous-échantillons dont un, pesant environ 10g, était placé dans un tube pour centrifugeuse, et l'autre dans une petite tare d'aluminium. Les huit échantillons provenant du haut de la masse de sol traité étaient directement placés dans une petite tare d'aluminium. La centrifugation permettait de recueillir le fluide contenu dans les pores du sol alors que le sol contenu dans les petites tares servait à la mesure de la teneur en eau, du pH, et de la concentration totale en métaux lourds. Les sections 4.3.1 à 4.3.4 décrivent les procédures utilisées pour la centrifugation, la mesure des concentrations en métaux lourds, la mesure du pH, et la mesure de la teneur en eau. Aussi, à la section 4.3.3 on explique comment les essais tampons, dont les résultats sont discutés au chapitre 3, ont été conduits sur les sols non traités. Il ne sera pas question des analyses au microscope électronique, le travail ayant été fait par un technicien qualifié.

4.3.1 Centrifugation et mesure de la concentration en métaux lourds dans le fluide interstitiel

Pour la centrifugation, le sol était inséré dans des tubes de type centrex (Schleicher & Schiell), munis d'un réceptacle de 1,5cm³. La centrifugeuse Medifuge (Carlab) tournait durant 30 minutes à 3000 rpm. On séparait ensuite le réceptacle contenant le fluide interstitiel, on y enfonçait un bouchon de plastique, et on le remisait à la noirceur et à 4°C. La détermination de la concentration en métaux lourds dans le fluide était faite le plus tôt possible en utilisant la spectroscopie par absorption atomique (SAA). C'est le responsable du laboratoire d'environnement du département de génie civil qui a procédé à toutes les analyses de SAA.

4.3.2 Teneur en eau et préparation du sol

Le sol humide contenu dans la petite tare d'aluminium était pesé et placé dans une étuve pour au moins 24 heures. À la sortie de l'étuve, le sol était de nouveau pesé pour permettre le calcul de la teneur en eau. Par la suite, l'échantillon de sol sec était écrasé dans un mortier avant d'être entreposé dans une petite fiole fermée.

4.3.3 pH et essais de capacité tampon

La préparation d'une mesure de pH se fait en mélangeant 5g de sol sec à 5g d'eau distillée dans une petite bouteille de verre. Le tout repose 24 heures et on mesure ensuite le pH à l'aide d'un appareil HACH ONE de modèle 43800-00. Un essai tampon est la mesure du pH de sept échantillons de sol préparés de la façon suivante:

- Dans sept petites bouteilles de verre on place 5g du sol (sec) à caractériser.
- On ajoute 10ml d'eau distillée dans une des bouteilles. Dans les six autres bouteilles on ajoute 10ml d'une solution d'acide chlorhydrique 0,01N, 0,05N, 0,1N, 0,5N, 1N et 2N respectivement.
- On procède à la mesure du pH après 24 heures d'attente.

4.3.4 Mesure de la concentration totale en métaux lourds

On devait passer par trois étapes avant d'obtenir la concentration totale en métaux lourds: la digestion, la filtration et la SAA. La digestion consistait à déposer $1 \pm 0,0002\text{g}$ de sol sec dans un bécher, et à ajouter une certaine quantité d'acide concentré. Ensuite, on faisait évaporer l'acide à l'aide d'une plaque chauffante jusqu'à ce qu'il en reste juste assez pour recouvrir le sol. Dans le cadre de la présente recherche, l'évaporation successive de deux volumes de 20ml d'acide nitrique concentré a été adoptée comme méthodologie. Une fois la digestion terminée, on rinçait (avec de l'acide nitrique 10%) la paroi du bécher et on filtrait avec précaution le contenu. Le papier filtre utilisé était de type 934-AH (Whatman). Le filtrat était recueilli dans un ballon volumétrique de 50 ou 100ml et on complétait à la marque avec de l'acide nitrique 10%. La solution ainsi obtenue était bien brassée et une partie était conservée à la noirceur et à 4°C dans une bouteille de plastique. La SAA permettait de déterminer la concentration en plomb, en cuivre, en zinc et en chrome de la solution obtenue, et par de simples calculs on transposait alors la concentration de la solution à une concentration par rapport au sol.

4.4 Analyse des accessoires

Les accessoires sont la cathode et son dépôt, l'anode, les plaques de plastique, les papiers filtres ou les géotextiles. Les fluides obtenus lors des procédures décrites dans la présente section ont été conservés dans des contenants fermés hermétiquement, et les échantillons de fluide ont été gardés à la noirceur et à 4°C avant d'être analysés le plus tôt possible.

Les opérations de digestion, filtration et SAA ont été menées sur les papiers filtres ou les géotextiles suite aux essais CB1 à CB6. De cette façon, on pouvait déterminer la quantité absolue de métaux lourds retenus par ces accessoires. Cette opération s'est avérée particulièrement importante lorsqu'on a voulu vérifier si les géotextiles, utilisés pour la première fois, posaient un problème de rétention de métaux lourds. L'anode et les plaques de plastique ont aussi été caractérisées suite aux essais CB1 à CB6, mais d'une façon différente. Au lieu de digérer ces

accessoires, on les a fait tremper (au moins 24 heures) séparément dans de l'acide nitrique 10% avant de les rincer. Pour chacun des accessoires, le liquide obtenu a été réduit à l'aide d'une plaque chauffante avant d'être filtré. Ensuite, le filtrat a été recueilli dans un ballon volumétrique et on a complété à la marque avec de l'acide nitrique 10%. La solution ainsi obtenue a été bien brassée et une partie a été conservée dans une bouteille de plastique en vue de l'analyse par SAA. La cathode et son dépôt de métaux lourds ont été analysés pour tous les essais (sauf CB7), de la même façon que l'anode et les plaques de plastique. Il faut noter que le dépôt a été dissous par l'action de l'acide nitrique 10%, et que c'est de cette façon que l'on a pu déterminer la quantité de métaux extraits sous forme solide.

4.5 Analyse des échantillons de fluide

Par échantillons de fluide on entend les échantillons pris en cours de traitement et ceux recueillis à la fin d'un traitement. Les fluides recueillis à l'anode et à la cathode en fin d'essai étaient généralement réduits puis filtrés, avant d'être mis en bouteille (plastique) et analysés par SAA. Lorsque les volumes de ces fluides étaient considérables, on effectuait les analyses sur une fraction représentative. Encore une fois, les échantillons prêts à être analysés étaient entreposés à la noirceur et à une température de 4°C.

Les fluides échantillonnés en cours de traitement ont généralement tous subi, de façon directe, des analyses de métaux par SAA. En plus, certains échantillons ont subi des tests de pH et de conductivité. Les mesures de pH ont été effectuées à l'aide de l'appareil mentionné à la section 4.3.3 alors que les mesures de conductivité ont été faites par un appareil YSI MODEL 31 (Yellow springs instruments co.).

4.6 Tests de préacidification

Au total, cinq tests de préacidification ont été conduits sur le sol 4, neuf sur le sol de Coaticook, neuf sur le sol 5A, et dix sur le sol 5B. Pour ces quatre sols, on a utilisé de l'acide chlorhydrique et de l'acide nitrique à différentes concentrations. Aussi, on a utilisé une

- Mélange d'une certaine quantité d'acide à 50g de sol sec dans un bécher.
- Le bécher est couvert d'une pellicule de plastique tandis que le mélange repose au moins 24 heures.
- Le sol est analysé pour les concentrations totales en métaux lourds, les concentrations en métaux lourds solubles, et le pH. Les analyses sont faites selon les procédures décrites à la section 4.3.

Suite à trois traitements par électrocinétique, la procédure venant d'être décrite a été employée pour acidifier le sol 5. En tout, cinq essais de postacidification ont été menés sur le sol 5 avec de l'acide nitrique ou chlorhydrique, dans le but d'étudier la nature des liens entre le sol 5 et les métaux lourds.

Chapitre 5

Présentation des résultats

Les résultats détaillés des treize essais de décontamination sont présentés aux annexes A à M dans le même ordre qu'au tableau 4.1, et non dans l'ordre chronologique. On a choisi cette disposition parce que les essais CB1 à CB7 seront analysés au chapitre 6, les essais CB8 et CB12 au chapitre 7, et les essais CB9, CB10, CB11 et CB13 au chapitre 8. La première page de chacune des annexes présente, sous forme de tableaux, la caractérisation du sol avant, pendant, et après le traitement. Les éléments utilisés pour caractériser le sol sont la teneur en eau, le pH, et les concentrations en métaux lourds. Par exemple, au tableau A.1 la rubrique «Zn sol» veut dire «concentration totale en zinc» alors que la rubrique «Zn eau» veut dire «concentration en zinc dans l'eau des pores». À la tête d'une autre colonne, la rubrique «Zn sur sol» veut dire «fraction ou pourcentage du zinc sorbé au sol». La figure 5.1 est introduite pour éviter toute ambiguïté concernant la répartition des métaux lourds (Me) dans le sol, alors que la figure 5.2 montre comment sont étiquetées les seize tranches de sol prélevées à la fin d'un traitement. Les concentrations totales en métaux lourds, les concentrations dans l'eau des pores, ainsi que les pH sont aussi présentés sous forme de figures dans les annexes.

Me eau
Me sur sol

$$\left[\begin{array}{c} \text{Me eau} \\ \text{Me sur sol} \end{array} \right] \text{ Me sol}$$

$$\text{«Me sur sol»} = \left[\frac{\text{«Me sol»} - \left(\frac{w\% \times \text{«Me eau»}}{100} \right)}{\text{«Me sol»}} \right] \times 100$$

Figure 5.1 Répartition des métaux lourds dans un échantillon de sol

La figure 5.2 permet aussi de situer les plots entre lesquels les mesures de résistivité et de différence de potentiel ont été enregistrées. Les résultats de ces mesures sont présentés sous forme de tableaux et de graphiques dans toutes les annexes.

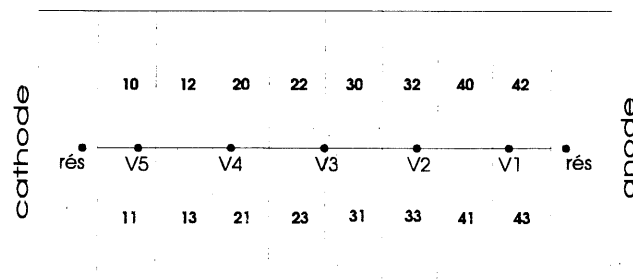


Figure 5.2 Étiquetage des tranches de sol et des plots

Dans chacune des annexes on trouve aussi un tableau résumant l'évolution du gradient électrique, de la consommation de charges et d'énergie, du débit électro-osmotique, et dans certains cas du pH des fluides de contrôle. L'évolution du débit-électro-osmotique est aussi décrite sous forme de graphique pour tous les essais. Les tableaux où on présente les bilans de masse sont d'autres tableaux qui seront utilisés souvent au cours des prochaines analyses

Le résumé des essais CB1 à CB13 est présenté aux tableaux 5.1 à 5.3. Ces tableaux montrent les paramètres de contrôle employés tels la densité de courant, le gradient électrique, la durée du traitement, et la nature des fluides anodique et cathodique. L'énergie consommée par unité de volume, ainsi que la quantité de charges passées sont aussi inscrites aux tableaux. Finalement, les concentrations initiales et finales en métaux lourds, ainsi que les taux d'extraction sont donnés.

La description et les résultats des tests de préacidification du sol 4, du sol de Coaticook, du sol 5A, et du sol 5B sont présentés aux tableaux 5.4 à 5.7 respectivement. La quantité de métaux lourds solubilisés par la préacidification est exprimée en pourcentages aux tableaux 5.5 à 5.7, et en ppm (par rapport au sol) au tableau 5.4. Pour certains tests, le pH du sol après acidification est aussi donné. Le tableau 5.8 est semblable aux tableaux 5.4 à 5.7 sauf qu'au lieu de présenter des tests de préacidification, il présente les tests de postacidification effectués avec le sol 5.

Tableau 5.1 Résumé des essais effectués avec le sol d'Ascot

essai	type de sol	contrôle à la cathode	contrôle à l'anode	gradient électrique (V/cm)	densité de courant (mA/cm ²)	durée (h)	énergie consommée (Wh/litre)	charge (C/litre)	métaux lourds	C _{initiale} (ppm)	C _{initiale} (meq/100g)	métaux sorbés (meq/100g)	C _{finale} moyenne (ppm)	métaux à extraire (meq/100g)	extraction (%)
CB1	Ascot	CH ₃ COOH 0,87M	CH ₃ COOH 0,87M	1,67→1,09 1,09→3,45	1,78	67	190	25 727	Zn	3245	9,93	2,58	243	0,74	93
CB2	Ascot	CH ₃ COOH 0,87M recirc.	idem CB1	1,35→1,08 1,08→3,81	1,75→1,51	68	218	25 709	Zn	3132	9,58	4,22	233	0,71	93
CB3	Ascot	idem CB2	idem CB1	1,73→1,10 1,10→3,84	1,74→1,59	69,5	215	25 977	Zn	2943	9	2,79	243	0,74	92
CB4	Ascot	idem CB2	idem CB1	1,61→1,09 1,09→3,77	1,74→1,28	84,5	290	30 511	Zn	3070	9,39	3,47	72	0,22	98
CB5	Ascot	idem CB2	idem CB1	1,15→0,99 0,99→1,56	1,71→0,37	145	191	29 370	Pb	4225	4,08	2,17	555	0,54	87
									Cu	1229	3,87	0,29	90	0,28	93
									total		7,95	2,46		0,82	90
CB6	Ascot	idem CB2	idem CB1	0,97→0,88 0,88→1,56	1,68→0,37	121	148	23 534	Pb	3883	3,75	1,53	482	0,47	87,5
									Cu	1084	3,41	0,04	102	0,32	91
									total		7,16	1,57		0,79	89
CB7	Ascot	idem CB2	idem CB1	0,56→1,57	1,19→0,42	353,5	343	29 370	Pb	5322	5,14	1,49	852	0,82	84
									Cu	1527	4,8	1,14	179	0,56	88,3
									total		9,94	2,63		1,38	86,1

Tableau 5.2 Résumé des essais effectués avec deux sols à forte teneur en carbonates

essai	type de sol & préacid. (mol/Kg)	contrôle à la cathode	contrôle à l'anode	gradient électrique (V/cm)	densité de courant (mA/cm ²)	durée (h)	énergie consommée (Wh/litre)	charge (C/litre)	métaux lourds	C _{initiale} (ppm)	C _{initiale} (meq/ 100g)	métaux sorbés (meq/ 100g)	C _{finale} moyenne (ppm)	métaux à extraire (meq/ 100g)	extraction (%)
CB8	sol 4 HCl 2,51	CH ₃ COOH 0,87M	H ₂ O	0,59→0,41 0,41→2,53	3,4	1050	4791	779 661	Pb	14 028	13,5	7,3	11 858	11,4	15
									Zn	1201	3,7	2,4	852	2,6	29
									total		17,2	9,7		14,0	19
CB12	Coaticook CH ₃ COOH 0,16	CH ₃ COOH 0,87M	NaOAc 1M H ₂ O Ca(OAc) ₂ 0,5M	très variable (annexe I)	3,8→0,6 3,8	191	939	166 167	Pb	4438*	4,3*	2,7	3449	3,3	23*
									Cu	1346*	4,2*	1,7	685	2,2	48*
									total		8,5*	4,4		5,5	35*

* ces résultats proviennent ou ont été calculés à partir du bilan de masse et non pas à partir de la concentration initiale.

Tableau 5.3 Résumé des essais effectués avec un sol industriel contaminé principalement au chrome

essai	type de sol & préacid. (mol/Kg)	contrôle à la cathode	contrôle à l'anode	gradient électrique (V/cm)	densité de courant (mA/cm ²)	durée (h)	énergie consommée (Wh/litre)	charge (C/litre)	métaux lourds	C _{initiale} (ppm)	C [*] _{initiale} (meq/ 100g)	métaux sorbés* (meq/ 100g)	C _{finale} moyenne (ppm)	métaux à extraire* (meq/ 100g)	extraction (%)
CB9	sol 5 HCl 0,87	CH ₃ COOH circulation	H ₂ O	0,47→3,82	3,19→0,68	162	734	55 050	Cr	8485	48,96	27,91	3687	21,27	57
									Pb	1851	1,79	1,54	727	0,7	61
									total		50,75	29,45		21,98	57
CB10	sol 5 HNO ₃ 0,87	idem CB9	H ₂ O	0,37→3,81	3,11→0,83	312	1374	109 178	Cr	7534	43,47	24,34	3574	20,62	53
									Pb	1811	1,75	1,49	1362	1,32	25
									total		45,22	25,83		21,94	51
CB11	sol 5 idem CB9	HCl circulation	H ₂ O	0,51→1,17	3,3	344	1115	249 361	Cr	7352	42,42	21,21	3253	18,77	56
									Pb	1731	1,67	1,5	453	0,45	73
									total		44,1	22,7		19,22	56
CB13	sol 5 CH ₃ COOH 0,34	idem CB9	H ₂ O	3,76→3,6 3,6→3,8	2,1→2,96 2,96→0,68	191	828	47 879	Cr	8611	49,69	45,21	5819	33,58	32
									Pb	2052	1,98	1,98	1991	1,92	3
									total		51,67	47,2		35,5	31

* on considère le chrome sous la forme Cr³⁺.

Tableau 5.4 Tests de préacidification conduits sur le sol 4

test	type d'acide	concentration (N)	W _{initial} (%)	W _{ajouté} (%)	W _{mesuré} (%)	ions H ⁺ ajoutés (mole H ⁺ /Kg de sol sec)	plomb soluble (ppm)	zinc soluble (ppm)	pH
sol 4 - 1	HNO ₃	15,9	3,6	20,7	12*	3,29	n.d.	n.d.	5,18
sol 4 - 2	HNO ₃	4	3,6	20,7	20,4	0,83	1032	102	6,1
sol 4 - 3	HCl	12,1	3,6	20,7	17,4	2,51	8677	564	5,88
sol 4 - 4	HCl	3	3,6	20,7	22	0,62	37	8	6,27
sol 4 - 5	1HNO ₃ :3HCl	13	3,6	20,7	15,8	2,69	5086	474	5,84

* le sol avait l'aspect d'une pâte et il n'était pas possible d'extraire l'eau des pores par centrifugation.

Tableau 5.5 Tests de préacidification conduits sur le sol de Coaticook

test	type d'acide	concentration (N)	W _{initial} (%)	W _{ajouté} (%)	ions H ⁺ ajoutés (mole H ⁺ /Kg de sol sec)	plomb soluble* (%)	cuivre soluble** (%)	pH
CTK - 1	HCl	0,4	0	20	0,08	0,06	0,3	5,98
CTK - 2	HCl	2,5	0	20	0,5	1,6	1,2	7,45
CTK - 3	HCl	5	0	20	1	16	78	5,13
CTK - 4	HNO ₃	0,4	0	20	0,08	0,05	0,7	6,88
CTK - 5	HNO ₃	2,5	0	20	0,5	65	63	5,34
CTK - 6	HNO ₃	5	0	20	1	78	87	4,45
CTK - 7	1HNO ₃ :3HCl	0,4	0	20	0,08	0,1	0,6	5,79
CTK - 8	1HNO ₃ :3HCl	2,5	0	20	0,5	0,6	1,7	6,78
CTK - 9	1HNO ₃ :3HCl	5	0	20	1	11	79	4,82

* basé sur une concentration totale de 4945ppm déterminée à partir de trois échantillons recueillis dans la masse de sol testée.

** basé sur une concentration totale de 1359ppm déterminée à partir de trois échantillons recueillis dans la masse de sol testée.

Tableau 5.6 Tests de préacidification conduits sur le sol 5A

test	type d'acide	concentration (N)	W _{initial} (%)	W _{ajouté} (%)	W _{mesuré} (%)	ions H ⁺ ajoutés (mole H ⁺ /Kg de sol sec)	chrome soluble*	plomb soluble**	pH
5A-1	H ₂ O	n.a.	8,9	15,2	24,7	0	0,8	0	5,8
5A-2	HCl	0,01	8,9	13,1	20,2	1,3x10 ⁻³	0,4	0	5,7
5A-3	HCl	0,1	8,9	13,1	20,9	1,3x10 ⁻²	0	0	5,2
5A-4	HCl	1	8,9	13,1	20,5	0,13	0,2	0	3,7
5A-5	HCl	2,5	8,9	13,1	19,9	0,32	15,6	5,9	n.d.
5A-6	HCl	5	8,9	13,1	19,7	0,65	29	33,5	n.d.
5A-7	HNO ₃	1	8,9	13,1	20,6	0,13	11,2	6,7	n.d.
5A-8	HNO ₃	2,5	8,9	13,1	20,7	0,32	20,7	16,2	n.d.
5A-9	HNO ₃	5	8,9	13,1	20,9	0,65	41,8	16,2	n.d.

* basé sur une concentration totale de 5504ppm déterminée à partir de trois échantillons recueillis dans la masse de sol testée.

** basé sur une concentration totale de 553ppm déterminée à partir de trois échantillons recueillis dans la masse de sol testée.

Tableau 5.7 Tests de préacidification conduits sur le sol 5B

test	type d'acide	concentration (N)	W _{initial} (%)	W _{ajouté} (%)	W _{mesuré} (%)	ions H ⁺ ajoutés (mole H ⁺ /Kg de sol sec)	chrome soluble*	plomb soluble**	pH
5B-1	H ₂ O	n.a.	13,4	11,3	22,8	0	2,6	0	6,0
5B-2	HCl	0,01	13,4	11,3	23,8	1,1x10 ⁻³	0,7	0	5,9
5B-3	HCl	0,1	13,4	11,3	23,7	1,1x10 ⁻²	1,2	0	5,5
5B-4	HCl	1	13,4	11,3	23,2	0,11	8,9	0,4	3,3
5B-5	HCl	2,5	13,4	11,3	22,4	0,28	27,6	2,2	n.d.
5B-6	HCl	5	13,4	11,3	22,4	0,57	91,3	9,1	n.d.
5B-7	HNO ₃	1	13,4	11,3	23,6	0,11	11,5	0	n.d.
5B-8	HNO ₃	2,5	13,4	11,3	23,6	0,28	38,8	0,2	n.d.
5B-9	HNO ₃	5	13,4	11,3	23,4	0,57	90,2	2	n.d.
5B-10	HNO ₃	10	19,1	5,7	23,3	0,57	92,8	2,2	n.d.

* basé sur une concentration totale de 4326ppm déterminée à partir de trois échantillons recueillis dans la masse de sol testée.

** basé sur une concentration totale de 2545ppm déterminée à partir de trois échantillons recueillis dans la masse de sol testée.

Tableau 5.8 Tests de postacidification conduits sur le sol 5

test	acide	concent. (N)	zone	W _{ajouté} (%)	ions H ⁺ ajoutés (mole/Kg)	avant postacidification				après postacidification		pH
						Cr total (ppm)	Cr sorbé (ppm)	Pb total (ppm)	Pb sorbé (ppm)	Cr sorbé (ppm)	Pb sorbé (ppm)	
CB9	HCl	8	42-43 (sec)	20*	0,87	3127	3121	376	374	1368	101	3,21
CB10	HNO ₃	8	42-43 (sec)	20*	0,87	2650	2645	1436	1433	1980	185	4,1
CB11(a)	HCl	5	CB11 homogène w=8%	12	0,6	3049	3049	524	498	2269	416	2,18
CB11(b)	HCl	8	CB11 homogène w=8%	12	0,97	3656	3656	450	428	2534	54	2,22
CB11(c)	HCl	12	CB11 homogène w=8%	12	1,45	4220	4220	510	484	3070	0	3,31

* une certaine quantité d'eau est ajoutée avant d'introduire l'acide

Chapitre 6

Essais préparatoires et réalisation de l'essai de 100 litres

Directement ou indirectement, sept essais sont reliés à la préparation et à la réalisation de l'essai CB7 en cellule de 100 litres. Mis à part le développement de la technologie électrocinétique à grande échelle, les sept essais contribuent aussi à la compréhension générale du sujet. Les essais CB1 à CB4, réalisés avec du sol d'Ascot artificiellement contaminé au zinc, font l'objet de la section 6.1 alors que les essais CB5 à CB7, réalisés avec du sol d'Ascot artificiellement contaminé au plomb et au cuivre, font l'objet de la section 6.2. La section 6.3 présente les conclusions issues des sujets discutés aux sections 6.1 et 6.2.

6.1 Traitement d'un sol artificiellement contaminé au zinc

Le tableau 5.1 montre que les essais CB1 à CB3 ont permis de faire passer la concentration moyenne en zinc du sol d'Ascot d'environ 3000ppm à moins de 250ppm (sous le critère B du MENVIQ). L'essai CB4, dans lequel plus d'énergie a été appliquée, a pour sa part mené la concentration moyenne en zinc du sol d'Ascot sous le critère A. Les paramètres entourant les essais CB1 à CB4 ont été établis à partir des travaux effectués par BEAULIEU (1995) et COUTURE (1994) sur du sol d'Ascot contaminé au plomb. Comme le but spécifique de l'essai CB1 était de voir si on pouvait extraire le zinc avec autant d'efficacité que le plomb, on conclut que ce but a été atteint.

Les essais CB2 à CB4 avaient les mêmes paramètres que l'essai CB1 sauf que chacun d'eux a subi une ou des modifications relativement au design de l'essai en cellule de 100 litres.

La raison et l'impact de ces modifications sont les points de discussion de la section 6.1.1. Les résultats des essais CB1 à CB4 permettent aussi d'étudier la migration du front acide et du front d'acétates générés lors du traitement électrocinétique. Dans la section 6.1.3, à l'aide de données expérimentales, on montre la cohérence d'un modèle de migration proposé à la section 6.1.2. Finalement, dans la section 6.1.4 on montre que le mécanisme de sorption du zinc sur le sol d'Ascot était de nature non spécifique.

6.1.1 Conception de l'essai en cellule de 100 litres

Par opposition à une simple circulation de l'acide acétique à la cathode lors de l'essai CB1, l'acide acétique a été recirculé au cours de l'essai CB2. La recirculation a pour avantage de réutiliser le fluide de contrôle, menant à un procédé plus économique et pratique. L'extraction du zinc en CB2 a été aussi bonne qu'en CB1 mais on remarque que l'essai CB2 a consommé une énergie de 218Wh/litre par rapport à 190Wh/litre pour l'essai CB1. On ne peut pas imputer directement cette hausse de consommation à la recirculation parce que le contrôle du pH à la cathode n'a pas été effectué de la même façon en CB2 qu'en CB1. En effet, les tableaux A.5 et B.5 montrent que le pH a augmenté graduellement de 3,23 à 4,08 en CB1, alors qu'en CB2 le pH a été maintenu entre 2,83 et 3,25. De toute façon, la différence de consommation d'énergie n'est pas dramatique et on a décidé de procéder à la recirculation lors de l'essai de 100 litres. La recirculation a aussi pour effet de faire augmenter la concentration des métaux en solution. Ceci est un autre avantage puisqu'il semble que l'on peut ainsi récupérer plus de métal sous forme solide. Au cours de l'essai CB2, environ 28% de la quantité totale de zinc s'est électrodéposé à la cathode par rapport à seulement 6,5% pour l'essai CB1. Ces dernières informations sont tirées des tableaux A.6 et B.6.

Dans le cas de l'essai de 100 litres il était inconcevable d'utiliser des papiers filtres pour séparer le sol des fluides anodique et cathodique. Une toile géotextile résistante et perméable a été mise à l'essai durant l'essai CB3. De plus, en vue d'économiser sur la quantité de matériaux nécessaire à la fabrication des électrodes, on a utilisé une cathode occupant environ le tiers de la section de sol. Le tableau 5.1 montre que les performances des essais CB2 et CB3 ont été identiques, ce qui a permis l'utilisation de toiles géotextiles et d'électrodes réduites pour l'essai en cellule de 100 litres. Toutefois, certaines vérifications ont été effectuées avant de prendre

définitivement la décision d'utiliser des toiles géotextiles et des électrodes réduites pour l'essai en cellule de 100 litres. Premièrement, on a vérifié si la toile géotextile avait la mauvaise qualité de retenir des métaux lourds. Les résultats du tableau C.6 indiquent que la toile géotextile n'a pratiquement pas retenu de zinc. Deuxièmement, on était concerné par le fait que la distribution du champ électrique entre les électrodes réduites pourrait conduire à une extraction plus faible dans les quatre coins de la masse de sol à traiter. Un échantillonnage ponctuel fait à une extrémité de la tranche 10 a montré que la concentration en zinc à cette extrémité était la même que la concentration moyenne de la tranche. Ainsi, il semble que le contraste moyen de conductivité entre le sol et les fluides contenus dans les réservoirs était assez prononcé pour permettre une répartition suffisamment uniforme du courant dans le sol. L'utilisation d'une cathode plus étroite a aussi pour effet d'augmenter la densité de courant à la surface de celle-ci. La densité de courant est un facteur important lorsqu'on parle d'électrodéposition [MOHLER, 1969; RAUB et coll., 1967], et il semble que l'augmentation de la densité de courant aura favorisé l'électrodéposition du zinc. En effet, on remarque que 45% du zinc s'est électrodéposé lors de l'essai CB3 comparativement à 28% pour l'essai CB2 (tableaux B.6 et C.6).

Les tableaux A.2, B.2 et C.2 montrent que la concentration en zinc dans le sol, à la fin des essais, était généralement plus grande dans le bas que dans le haut de la masse de sol traité. Associant cette situation à la non-homogénéité du fluide cathodique, on a recirculé le fluide cathodique de l'essai CB4 à un débit dix fois plus grand que le débit des essais CB2 et CB3. Cependant, cette stratégie a été peu concluante comme en témoigne les données du tableau D.2. Pour contrer cette situation il a été décidé d'homogénéiser, à l'aide de mélangeurs, les fluides des réservoirs cathodique et anodique au cours de l'essai de 100 litres.

6.1.2 Modélisation de la migration ionique

On sait qu'un traitement par électrocinétique se caractérise par la migration d'un front acide de l'anode vers la cathode et d'un front d'ions négatifs de la cathode vers l'anode. Ces ions négatifs sont des acétates (CH_3COO^-) lorsque, comme dans le cas présent, l'acide de contrôle à la cathode est de l'acide acétique. Dans cette section on propose un modèle expliquant comment les ions H^+ et les acétates auraient migré au cours des essais CB1 à CB4. Le modèle proposé est simple et fait appel au principe de transport par migration ionique, à

l'électroneutralité et à l'une des hypothèses proposées par BEAULIEU (1995). On ne considèrera pas l'effet des pH et des concentrations dans les réservoirs puisque ces paramètres varient peu entre les essais CB1 à CB4. Aussi, on négligera la présence des ions OH^- puisque leur concentration est fonction du pH dans les réservoirs. Par exemple, un pH de 3,0 dans le réservoir cathodique indique que la concentration en ions OH^- est de seulement $1 \times 10^{-11} \text{M}$. Tout au long du chapitre 6, on tentera de valider ce modèle à l'aide d'observations expérimentales.

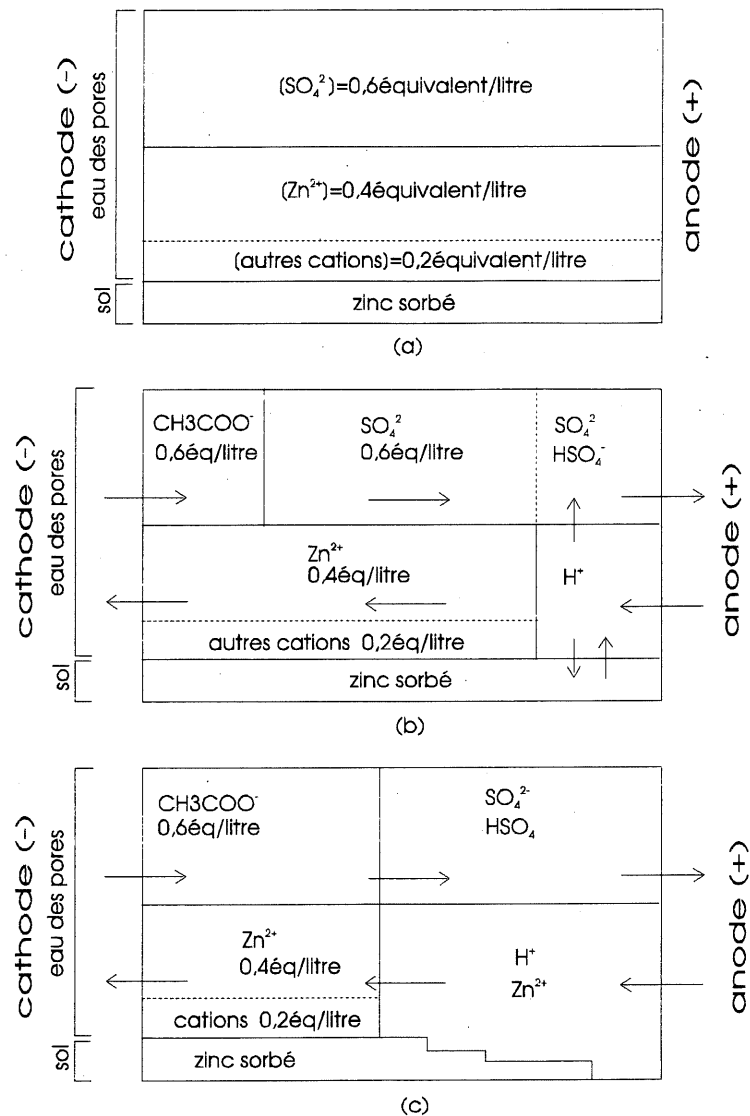


Figure 6.1 Modélisation simple de la migration ionique avant la rencontre des ions H^+ et des acétates (essais CB1 à CB4)

La répartition des ions, juste avant le début des essais CB1 à CB4, est schématisée à la figure 6.1(a). En moyenne (essais CB1 à CB4), une concentration de 3097ppm (mg/Kg matière sèche) de zinc a été introduite dans le sol et il en résulte que la concentration en ions SO_4^{2-} devait être d'environ 0,3M (0,6 équivalent/litre) dans l'eau des pores (les ions SO_4^{2-} sont considérés comme étant tous solubles). Une partie du zinc introduit était initialement sorbé alors que l'autre partie s'est retrouvée dans l'eau des pores pour une concentration moyenne d'environ 0,2M ou 0,4 équivalent/litre (13 000ppm). Pour satisfaire le principe de l'électroneutralité, des cations autres que le zinc devaient être en solution, et la concentration totale de ces derniers devait correspondre à 0,1M (0,2 équivalent/litre) de cations bivalents.

Lors de la mise sous tension, un gradient électrique s'est développé en fonction du courant appliqué et de la résistivité du sol. L'application directe de l'équation 2.21 montre que tous les ions SO_4^{2-} devaient migrer en bloc vers l'anode, tandis que le zinc et les autres cations en solution devaient migrer en bloc vers la cathode. Aussi, pour que la migration se produise en respectant l'électroneutralité, les ions SO_4^{2-} devaient être remplacés par une quantité équivalente d'acétates, et les cations devaient être remplacés par une quantité équivalente d'ions H^+ . Donc, la figure 6.1(b) montre que les acétates auraient pénétré dans le sol avec une concentration de 0,6M (0,6 équivalent/litre), tout comme les ions H^+ . Cependant, une fois dans le sol les ions H^+ auraient réagi avec la surface du sol par échange cationique pour libérer du zinc, et ils auraient aussi réagi avec les sulfates selon l'équation suivante [HARRIS, 1991]:



L'interaction du front acide avec son milieu porte à supposer que la concentration en ions H^+ était probablement plus petite que 0,6M (0,6 équivalent/litre) dans la région de l'anode.

Après un certain laps de temps, le front acide aurait rencontré le front d'acétates à un endroit où les sulfates n'étaient plus présents, et où le zinc en solution provenait de ce qui était sorbé. À cet endroit, les ions H^+ et CH_3COO^- devaient donc être dominants (figure 6.1(c)). BEAULIEU (1995) a fait l'hypothèse que la rencontre d'un front acide et d'un front d'acétates engendre une augmentation abrupte de la résistivité du sol. Il attribue cette augmentation au fait que l'acide acétique formé lors de la rencontre des deux fronts est faiblement dissocié

(équation 6.2) et donc peu conducteur. On ne s'est pas fixé comme objectif de modéliser ce qui s'est produit suite à l'étape décrite par la figure 6.1(c), mais on suppose que des acétates et des ions H^+ ont continué de migrer vers l'anode et la cathode respectivement.

$$\frac{[CH_3COO^-][H^+]}{CH_3COOH} = 1,75 \times 10^{-5} \quad (6.2)$$

6.1.3 Migration du front acide et du front d'acétates

On débutera l'analyse en déterminant, selon l'hypothèse proposée par BEAULIEU (1995), le moment et le lieu où la rencontre des deux fronts se serait produite. Par la suite, on appuiera cette hypothèse en établissant des liens entre les positions prédites des deux fronts, le pH, et la résistivité du sol. De plus, on montrera qu'il est justifié de croire que les deux fronts pénètrent dans le sol avec une concentration de 0,6M, et que leur rencontre provoque une hausse abrupte de résistivité. La figure 6.2 est introduite pour permettre au lecteur de suivre plus facilement la suite de cette section.

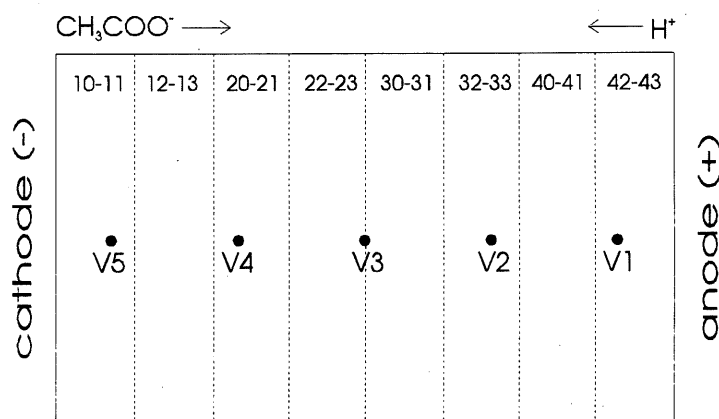


Figure 6.2 Migration du front acide et du front d'acétates

La première augmentation brusque de résistivité s'est produite entre les plots V3 et V4 après environ 40 heures de traitement (figures A.2(a), B.2(a), C.2(a) et D.2(a)). La figure D.2(a) permet de cerner le moment de l'augmentation brusque à $t = 41,5h$. Le plot V4 étant situé plus près de la cathode que de l'anode, on peut dire que le front acide aurait migré plus rapidement

que le front d'acétates. Cependant, on remarque qu'une augmentation brusque de résistivité s'est produite en V2-V3, peu de temps après l'augmentation en V3-V4. Ce dernier fait indique que les deux fronts se seraient rencontrés du côté de la cathode, mais très près du centre de l'échantillon de sol. On en conclut que la vitesse des ions H^+ n'était probablement pas de beaucoup supérieure à celle des ions CH_3COO^- avant la rencontre des deux fronts. Cette conclusion est surprenante quand on considère que la mobilité ionique à dilution infinie des ions H^+ est 8,5 fois plus grande que celle des ions CH_3COO^- (tableau 2.3). Cependant, il n'est pas question de dilution infinie dans le cadre d'un essai électrocinétique (les données du tableau 2.3 ne peuvent qu'indiquer des tendances). De plus, en prenant l'exemple de l'essai CB4 à $t=41,5h$ (soit lorsque le front acide occupe la zone V1-V2 et que le front d'acétates occupe la zone V4-V5) on remarque que la résistivité du sol (et donc le gradient électrique) était environ trois fois plus grande en V4-V5 qu'en V1-V2 (tableau D.4). À gradient électrique égal, la vitesse du front acide aurait été environ trois fois plus grande que celle du front d'acétates.

Pour les essais CB1 à CB4, la résistivité initiale entre les plots V4 et V5 se situait entre 410 et 480ohm·cm (tableaux A.4, B.4, C.4 et D.4). Dans les premières heures de traitement la résistivité en V4-V5 a diminué légèrement pour augmenter graduellement et se stabiliser par la suite. La résistivité s'est stabilisée entre 600 et 700ohm·cm, au moment où la résistivité en V3-V4 augmentait à son tour. Il est plausible que cette augmentation de la résistivité du sol de la cathode vers l'anode, était due à la migration des ions CH_3COO^- provenant de l'acide de contrôle. En remplaçant des ions plus mobiles qu'eux (ions SO_4^{2-} initialement présents) les ions CH_3COO^- auraient engendré une hausse de résistivité. En se basant sur l'augmentation progressive de la résistivité en V4-V5 il est possible de calculer la vitesse des ions CH_3COO^- (v_{OAc}), leur mobilité ionique (u^*_{OAc}) et le coefficient de tortuosité apparente (τ_{aOAc}). Les valeurs de v_{OAc} , u^*_{OAc} , et τ_{aOAc} sont valides pour du sol d'Ascot artificiellement contaminé par une quantité de sulfate de zinc correspondant à 3000ppm de zinc. L'appendice 1 montre les calculs et les hypothèses nécessaires à l'obtention de v_{OAc} , u^*_{OAc} , et τ_{aOAc} :

$$v_{OAc} = 4,9 \times 10^{-5} \text{cm/s}$$

$$u^*_{OAc} = 5,3 \times 10^{-5} \text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$$

$$\tau_{aOAc} = 0,12$$

Avec une vitesse de $4,9 \times 10^{-5} \text{cm/s}$ et après 41,5 heures de traitement, le front d'acétates devait se situer à 7,3cm du réservoir cathodique, soit dans la zone V3-V4 où la première augmentation brusque de résistivité a eu lieu. Il n'est pas possible de répéter le même exercice avec le front acide parce que, dans les 41,5 premières heures, la résistivité a chuté continuellement en V1-V2 et V2-V3 sans qu'il y ait de démarcation.

Le tableau 6.1 permet de constater que pour l'essai CB1, le pH final dans la zone 32-33 était de 2,79 comparativement à un pH oscillant autour de 3,7 pour les trois autres essais. Pour expliquer ce fait, on suppose que le front d'acétates n'aurait pas atteint la zone 32-33 lors de l'essai CB1, et que le pH de 2,79 est le résultat de l'association du front acide avec les sulfates initialement présents dans le sol. Lors des essais CB2 à CB4, le front d'acétates aurait atteint la zone 32-33, causant une augmentation du pH. On en conclut qu'à plus long terme le pH des zones 40-41 et 42-43 aurait probablement augmenté.

Tableau 6.1 Migration du front d'acétates dans la zone V1-V2

essai	$R_i \rightarrow R_f$ V1-V2 (Ohm·cm)	pH ₄₂₋₄₃	pH ₄₀₋₄₁	pH ₃₂₋₃₃
CB1	450→162	2,53	2,6	2,79
CB2	521→934	2,38	2,3	3,53
CB3	454→652	2,42	2,34	3,74
CB4	476→1443	2,32	2,36	3,82

Le fait que la zone V1-V2 englobe une partie de la zone 32-33 permet de faire une association entre le pH, la résistivité du sol et la migration du front d'acétates. En effet, le tableau 6.1 fait ressortir que la résistivité du sol n'a jamais augmenté dans la zone V1-V2 lors de l'essai CB1, ce qui est cohérent avec la supposition que les acétates n'avaient pas atteint la zone 32-33. Aussi, l'augmentation de la résistivité au cours des essais CB2 à CB4 correspond à la présence des acétates dans la zone 32-33, ce qui appuie l'hypothèse selon laquelle la rencontre des ions H^+ et des ions CH_3COO^- produit une augmentation de la résistivité du sol.

Le tableau 6.2 montre qu'un traitement plus poussé, en l'occurrence l'essai CB4, a permis d'abaisser le pH dans la zone 10-11. Dans cette zone le pH moyen des essais CB1 à CB3 était de 5,37 en fin d'essai comparativement à 4,54 pour l'essai CB4. Cela veut dire qu'un traitement plus long aurait permis au front acide de progresser plus loin. La hausse de résistivité (1130ohm·cm dans le cas de l'essai CB4 comparativement à 738ohm·cm en moyenne pour les autres essais) associée à cette progression vient encore appuyer l'hypothèse selon laquelle la rencontre des ions H^+ et des ions CH_3COO^- produit une augmentation de la résistivité dans le sol.

Tableau 6.2 Migration du front acide dans la zone V4-V5

essai	charge (C/litre)	$R_i \rightarrow R_{f\ V4-V5}$ (Ohm·cm)	pH ₁₀₋₁₁
CB1	25 727	415→644	5,44
CB2	25 709	478→785	5,26
CB3	25 977	429→785	5,4
CB4	30 511	451→1130	4,54

Sachant que le courant a été de 125mA durant les 41,5 premières heures du traitement, on peut évaluer la concentration maximale des ions H^+ et des acétates juste avant la rencontre des deux fronts. Les hypothèses et les calculs nécessaires à l'évaluation des concentrations sont présentés à l'appendice 2. En considérant que l'électrolyse de l'eau se fait à 100%, et qu'il n'y a pas d'accumulation dans les réservoirs, on calcule une concentration d'environ 0,9M pour les deux espèces. Cependant, il semble invraisemblable qu'une concentration si élevée soit atteinte parce qu'il est douteux que l'électrolyse de l'eau se fasse à 100%, et parce que les ions H^+ et les acétates s'accumulent probablement dans les réservoirs. Les valeurs proposées à la section 6.1.2 (0,6M) seraient plus réalistes. Pour se donner une idée de l'impact que peut avoir le face à face entre le front acide et le front d'acétates, on calcule les concentrations résultant de la rencontre de deux fronts à l'appendice 2. Les concentrations en acétates et en ions H^+ passeraient de 0,6M à seulement $3,2 \times 10^{-3}M$.

6.1.4 Adsorption non spécifique du zinc

Les excellents taux d'extraction, obtenus lors des essais CB1 à CB4, indiquent que les liens du zinc avec le sol étaient possiblement faibles, électrostatiques ou de nature non spécifique. De plus, on remarque qu'il n'a pas été nécessaire d'abaisser le pH du sol pour désorber le zinc. En effet, au tableau 6.3 on peut voir que la quantité résiduelle de zinc sorbé était beaucoup plus petite que la quantité initiale dans les zones où le pH a augmenté en cours d'essai.

Tableau 6.3 Désorption du zinc dans les zones de pH élevé

essai-zone	pH initial	pH final	zinc sorbé initialement (ppm)	zinc sorbé en fin d'essai (ppm)
CB1-11	4,68	5,88	856	108
CB1-13	4,68	5,42	856	217
CB2-11	4,7	5,46	1380	431
CB2-13	4,7	4,8	1380	256
CB3-11	4,42	5,48	922	342
CB3-13	4,42	4,74	922	293
CB4-11	4,53	4,55	1127	156

6.2 Traitement d'un sol artificiellement contaminé au plomb et au cuivre

L'essai CB7, réalisé en cellule de 100 litres, attire l'attention en raison de son volume relativement grand. Cependant, sans l'essai CB5 les résultats de l'essai CB7 auraient peu de valeur. Aux sections 6.2.2 et 6.2.3 on compare les essais CB5 et CB7 pour étudier deux questions importantes: l'effet du changement d'échelle sur la quantité de charges requises pour décontaminer un sol, et l'effet du changement d'échelle sur la consommation d'énergie. Auparavant, la comparaison des essais CB5 et CB6 aura permis d'étudier l'effet de la teneur en

eau, afin de guider le choix de la teneur en eau initiale de l'essai CB7. À la section 6.2.4, on réutilise la comparaison des essais CB5 et CB7 pour étudier le problème de l'homogénéité entre le bas et le haut d'une masse de sol traitée par électrocinétique.

L'évolution de la température au cours d'un essai par électrocinétique est un sujet peu documenté. Au cours de l'essai CB7, le suivi de l'évolution de la température a été fait et les résultats sont analysés à la section 6.2.5. Les deux sections suivantes sont consacrées à l'étude du phénomène de migration ionique. Premièrement, on examine la migration du front acide et du front d'acétates au cours des essais CB5 à CB7, comme cela a été fait pour les essais CB1 à CB4. Deuxièmement, on utilise les résultats intermédiaires de l'essai CB7 pour discuter du modèle de migration proposé à la section 6.1.2. En fait, ce modèle s'adapte bien aux essais CB5 à CB7 parce que le sol d'Ascot et l'acide acétique sont communs aux essais CB1 à CB7. À la dernière section, soit la section 6.2.8, on montre que le plomb et le cuivre étaient liés de façon semblable au zinc sur le sol d'Ascot.

6.2.1 Choix de la teneur en eau initiale pour l'essai de 100 litres

Ici, il s'agit de voir si l'augmentation de la teneur en eau initiale améliore le rendement d'un traitement par électrocinétique. En accord avec l'équation 2.21, une plus grande teneur en eau devrait rendre la migration ionique plus aisée (augmentation du coefficient $\theta = nS_r$). Par contre, augmenter la teneur en eau a le désavantage de réduire la masse volumique sèche (ρ_d) du sol à traiter.

Les résultats des essais CB5 et CB6 sont utilisés pour étudier l'effet de la teneur en eau. Alors que les concentrations initiales en plomb et en cuivre étaient légèrement supérieures dans le cas de l'essai CB5, la teneur en eau initiale de l'essai CB5 était de 16,8% comparativement à 20,9% pour l'essai CB6. Comme on s'y attendait, la résistivité initiale moyenne entre V1 et V5 était un peu plus faible pour l'essai CB6 (209ohm·cm) que pour l'essai CB5 (225ohm·cm), et ce même si les concentrations initiales en métaux lourds dans l'eau des pores étaient supérieures en CB5. Il en découle qu'une énergie de 148Wh/litre a été nécessaire pour faire circuler 31 065C lors de l'essai CB6 comparativement à une énergie de 165Wh/litre pour l'essai CB5. Cependant, lorsqu'on examine la consommation d'énergie par unité de masse on se rend compte que l'écart

entre les deux essais est moins significatif. En effet, une énergie de 93Wh/Kg de sol sec a été nécessaire pour faire circuler 31 065C lors de l'essai CB6 alors qu'une énergie de 95Wh/Kg de sol sec a été nécessaire pour l'essai CB5. Dans le cas de ces deux essais on peut donc conclure que la teneur en eau n'a pas influencé beaucoup la quantité d'énergie nécessaire au passage d'une certaine quantité de charges.

En terme de décontamination, il n'est pas évident que l'augmentation de la teneur en eau initiale ait eu de l'influence. En effet, bien que les taux d'extraction des deux essais soient identiques même si le nombre de charges passées était moindre dans le cas de l'essai CB6 (CB6 → 31 065C; CB5 → 35 538C), une quantité supérieure de métaux lourds (0,76meq/100g) a été extraite en CB5.

La comparaison des essais CB5 et CB6 montre que l'augmentation de la teneur en eau initiale ne procure pas d'avantages marqués, et on a jugé qu'il était inutile d'utiliser une grande teneur en eau en vue de l'essai CB7. On a alors visé une teneur en eau initiale voisine de celle de l'essai CB5 lorsqu'on a contaminé le sol de l'essai CB7.

6.2.2 Taux d'extraction obtenu lors de l'essai de 100 litres et nombre de charges

Pour les 102 litres de sol traité au cours de l'essai CB7 on a fait circuler un total de 2 995 691C, soit l'équivalent de 29 370C/litre. Ce choix a été fait pour comparer le taux d'extraction de l'essai CB7 avec celui de l'essai CB5, lors duquel une charge unitaire de 29 370C/litre a aussi circulé. Des taux d'extraction égaux pour les deux essais indiqueraient que la charge unitaire à appliquer, pour un taux d'extraction voulu, est indépendante du volume de sol à traiter. On rappelle qu'en plus d'être plus grand, le volume de sol traité en CB7 n'avait pas les mêmes proportions que le volume de sol contenu dans la cellule utilisée pour l'essai CB5. Les rapports de longueur (L), de largeur (l) et de hauteur (h) étaient les suivants:

$$\frac{L_{CB7}}{L_{CB5}} = 2,41 \quad ; \quad \frac{l_{CB7}}{l_{CB5}} = 6,5 \quad ; \quad \frac{h_{CB7}}{h_{CB5}} = 5,4$$

Avant de faire la comparaison entre les deux essais, on doit d'abord mentionner que les concentrations initiales en plomb et en cuivre étaient plus grandes pour l'essai CB7 que pour l'essai CB5. Le tableau 5.1 montre que les concentrations initiales en métaux lourds étaient de 9,94meq/100g et 7,95meq/100g pour les essais CB7 et CB5 respectivement.

Le taux d'extraction de 86,1%, obtenu suite à l'essai CB7, est un peu plus faible que le taux d'extraction de 89,7% obtenu suite à l'essai CB5. Par contre, 8,56meq/100g de métaux lourds ont été enlevés durant l'essai de 100 litres comparativement à 7,13meq/100g pour l'essai CB5. Ces résultats laissent croire que les taux d'extraction auraient été identiques si les concentrations initiales avaient été les mêmes. On peut donc conclure, sur la base d'une paire d'essais, que le nombre de charges par unité de volume qu'il faut appliquer pour traiter un sol donné est indépendant des dimensions de la cellule de traitement.

6.2.3 Influence du changement d'échelle sur la consommation d'énergie

À partir des équations 2.14 et 2.15, on obtient l'équation 6.3 qui exprime que l'énergie consommée (E) durant un certain intervalle de temps (t) est proportionnelle à la résistivité (ρ), au rapport longueur sur section (L/A) et au carré du courant (I).

$$E = \rho \frac{L}{A} I^2 t \quad (6.3)$$

En divisant l'équation 6.3 par le volume (L·A) on acquiert l'équation 6.4 où e est l'énergie volumique et i la densité de courant.

$$e = \rho i^2 t \quad (6.4)$$

Connaissant la charge unitaire (C/litre) requise pour décontaminer le sol de l'essai CB5 on convient que, pour une même densité de courant, 2,41 fois plus de temps serait requis pour atteindre la même charge unitaire au cours de l'essai CB7. Le facteur 2,41 provient du fait que la distance entre les grillages de plastique de la cellule de 100 litres est 2,41 fois plus grande que la distance «interplaque» de la cellule utilisée pour l'essai CB5. On a la chance de pouvoir illustrer

cette idée à l'aide des résultats des essais CB7 et CB5. En effet, les moyennes pondérées des densités de courant appliquées en CB7 ($0,92\text{mA}/\text{cm}^2$) et CB5 ($0,93\text{mA}/\text{cm}^2$) étaient presque les mêmes et il en résulte que le rapport $t_{\text{CB7}}/t_{\text{CB5}}$ a été de 2,44. Si les densités de courant avaient été constantes, et que les résistivités avaient été constantes et égales dans les deux cas, le rapport final $e_{\text{CB7}}/e_{\text{CB5}}$ aurait dû être égal à 2,39 ($\rho(0,92)^2353,5/\rho(0,93)^2145$). En réalité, le rapport final $e_{\text{CB7}}/e_{\text{CB5}}$ mesuré expérimentalement entre les deux réservoirs était de 1,79. On a calculé le rapport $e_{\text{CB7}}/e_{\text{CB5}}$ en utilisant la résistivité réservoir à réservoir, et non la résistivité anode à cathode, pour représenter le mieux possible ce qui s'est produit dans le sol.

La figure 6.3 montre que les densités de courant ont varié en fonction de la charge unitaire consommée lors des essais CB5 et CB7, alors que la figure 6.4 montre que les résistivités réservoir à réservoir ont aussi varié en fonction de la charge unitaire consommée. De plus, la résistivité du sol de l'essai CB7 a constamment été plus faible que la résistivité du sol de l'essai CB5. Il est probable que la différence entre les concentrations initiales en métaux lourds dans l'eau des pores (CB7 $\rightarrow 7,31\text{meq}/100\text{g}$; CB5 $\rightarrow 5,49\text{meq}/100\text{g}$) ait été responsable de la différence de résistivité. Les faits présentés dans ce paragraphe expliquent donc pourquoi l'application directe de l'équation 6.4 ne correspond pas à la réalité.

On a construit la figure 6.5 afin de cerner l'influence de la densité de courant sur le rapport $e_{\text{CB7}}/e_{\text{CB5}}$. La figure 6.5 présente deux courbes dont l'une est la consommation réelle d'énergie volumique (réservoir à réservoir) en fonction de la charge unitaire consommée lors de l'essai CB7. L'autre courbe représente la consommation d'énergie fictive de l'essai CB5, calculée en substituant la courbe de résistivité de l'essai CB5 par la courbe de résistivité de l'essai CB7. Dans ce dernier cas on suppose que si le sol de l'essai CB5 avait été moins résistif, il aurait été possible de conserver la même courbe de densité de courant en contrôlant ce courant. Le rapport final calculé à partir de la figure 6.5 est de 2,24 et représente l'influence de la densité de courant entre les essais CB5 et CB7. En considérant les paramètres i et ρ égaux en tout points, le rapport $e_{\text{CB7}}/e_{\text{CB5}}$ aurait dû être de 2,41 et on peut calculer un facteur d'influence de la densité de courant (f_i) égal à 0,93 ($2,24/2,41$). Le facteur d'influence de la résistivité (f_ρ) serait donc de 0,8 ($1,79/2,24$). On résume la discussion à propos du rapport $e_{\text{CB7}}/e_{\text{CB5}}$ par l'équation 6.5:

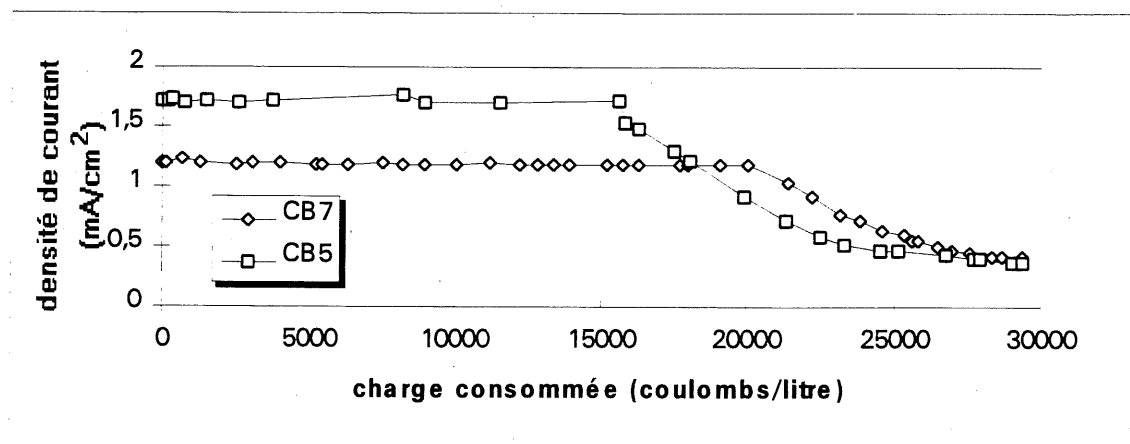


Figure 6.3 Variation de la densité de courant en fonction de la charge unitaire

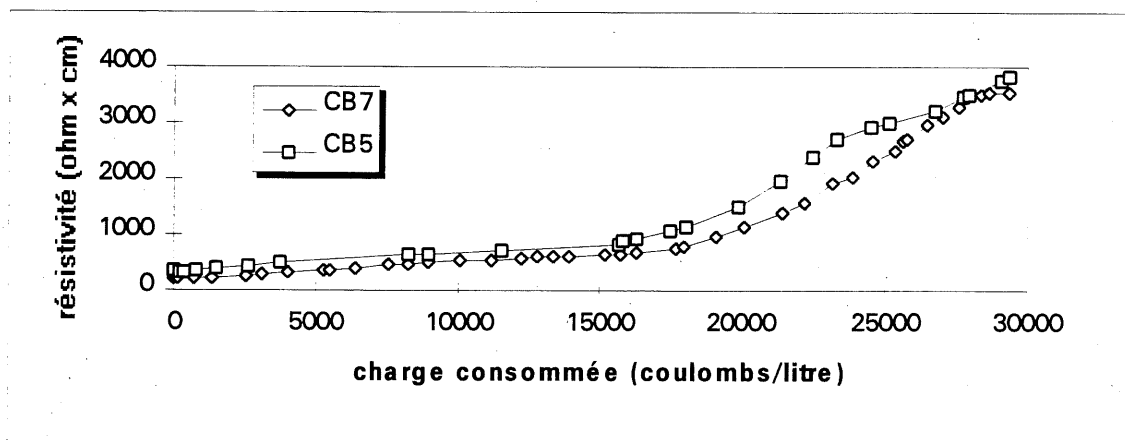


Figure 6.4 Variation de la résistivité en fonction de la charge unitaire

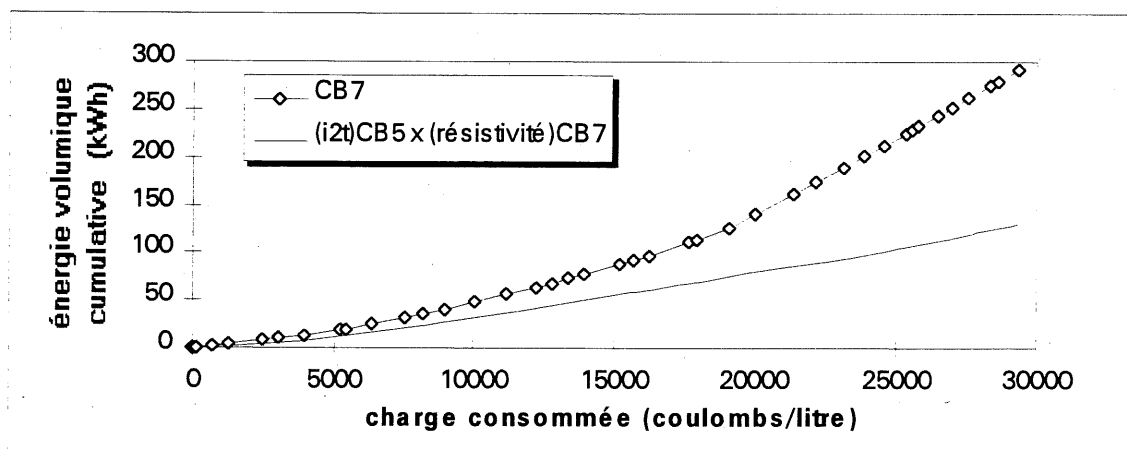


Figure 6.5 Énergie volumique consommée en fonction de la charge unitaire

$$\frac{e_{CB7}}{e_{CB5}} = f_p f_i \frac{L_{CB7}}{L_{CB5}} \quad (6.5)$$

En général, le facteur f_p ne devrait pas être nécessaire puisque des essais effectués sur des sols issus de la même source devraient être caractérisés par des courbes de résistivité identiques. En effet, la figure 6.4 laisse croire que si les résistivités initiales avaient été les mêmes en CB7 et en CB5, les courbes de résistivité auraient été les mêmes. En pratique, l'équation 6.5 devrait alors s'écrire comme suit (où GV veut dire «grand volume» et PV veut dire «petit volume»):

$$\frac{e_{GV}}{e_{PV}} = f_i \frac{L_{GV}}{L_{PV}} \quad (6.6)$$

Un facteur f_i très petit est théoriquement possible si on applique une densité de courant initiale très petite pour un essai à grand volume, comparativement à une densité de courant plus grande pour un essai à petit volume. Cependant, le rapport t_{GV}/t_{PV} pourra être de beaucoup supérieur au rapport L_{GV}/L_{PV} .

6.2.4 Homogénéité d'un traitement par électrocinétique

Durant tout l'essai CB5, on a utilisé un très grand débit de recirculation afin d'homogénéiser le fluide cathodique. Le débit utilisé ici était plus grand que celui de l'essai CB4, mais cela n'a pas empêché le clivage entre les concentrations finales du bas et du haut de l'échantillon de sol traité (figure 6.6). Le fait d'avoir mélangé le fluide anodique au cours de l'essai CB7, en plus d'avoir mélangé le fluide cathodique, semble avoir amélioré la répartition finale des concentrations (figure 6.7). La non-homogénéité des fluides de contrôle serait donc responsable de la différence entre les concentrations du bas et du haut d'un échantillon de sol traité par électrocinétique.

6.2.5 Évolution de la température au cours de l'essai de 100 litres

On sait que la chaleur dégagée par une résistance électrique augmente en fonction de la puissance. Au cours de l'essai CB7, on pouvait donc s'attendre à ce que la température, prise au

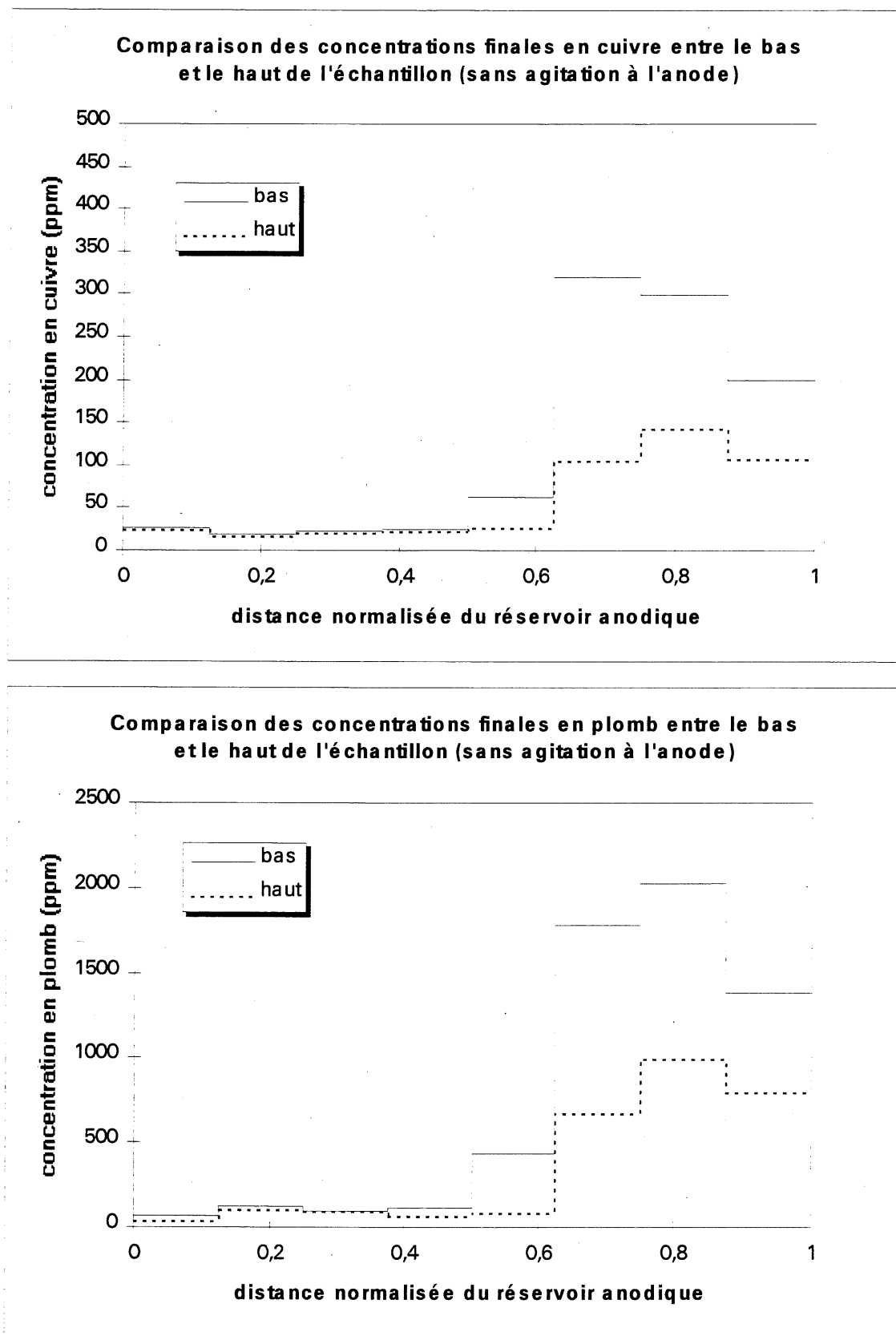


Figure 6.6 Répartition des concentrations au terme de l'essai CB5

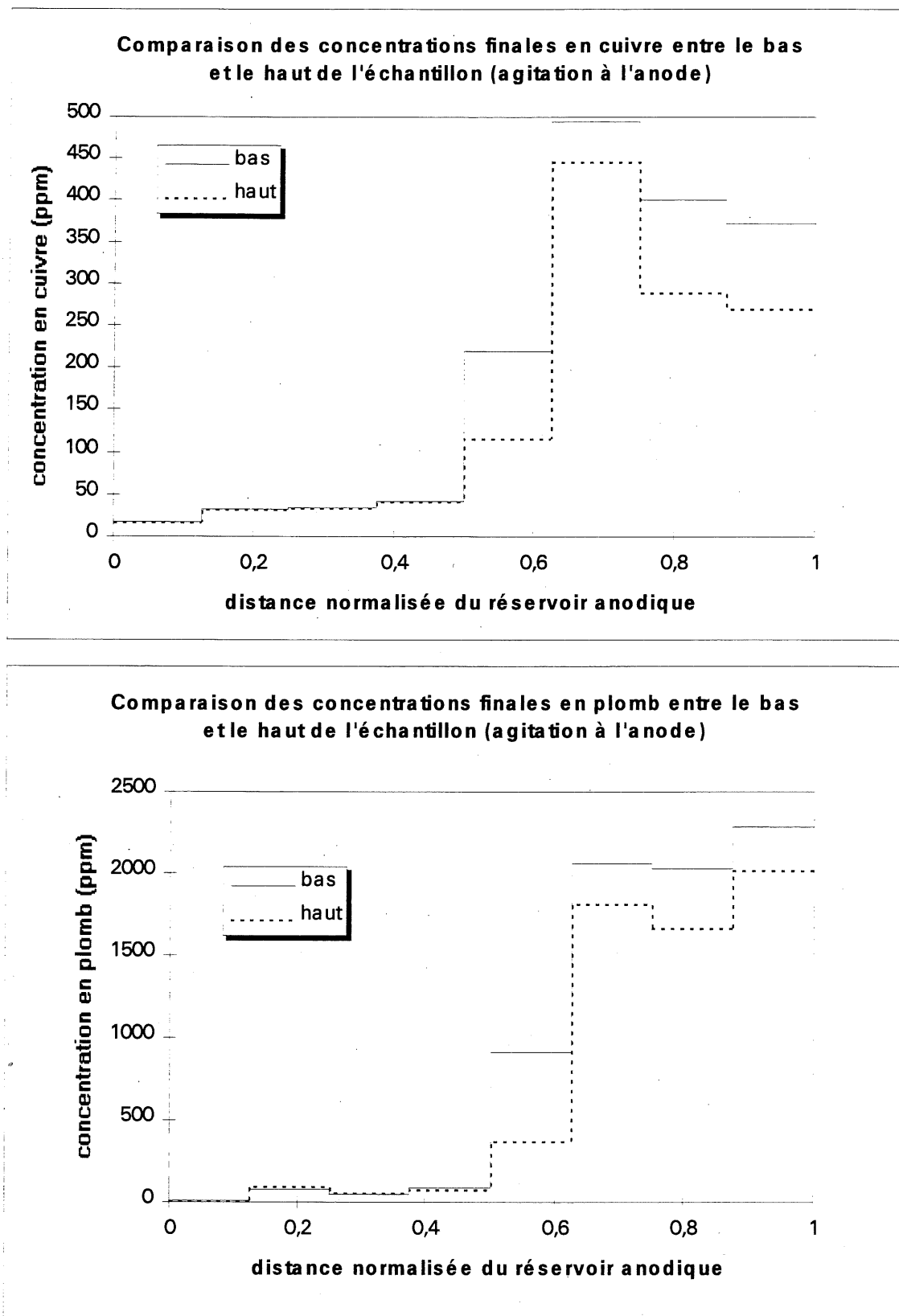


Figure 6.7 Répartition des concentrations au terme de l'essai CB7

centre de l'échantillon, évolue en fonction de la puissance. Comme le montre la figure 6.8, le profil de température à une forme semblable au profil de puissance, sauf que vers la fin de l'essai la température n'a pas diminué aussi rapidement que la puissance. La masse de sol de l'essai de 100 litres aurait donc agi comme un réservoir de chaleur. Ainsi, dans une masse considérable de sol, l'accumulation de chaleur pourrait occasionner des températures centrales assez élevées.

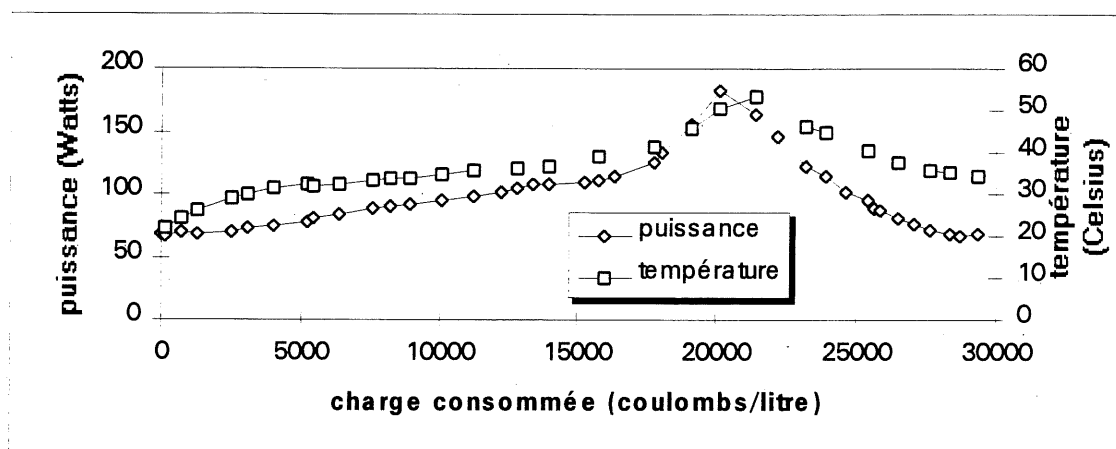


Figure 6.8 Évolution de la température au cours de l'essai de 100 litres

Théoriquement, des températures élevées devraient nuire à la migration des métaux lourds. En effet, l'équation 2.23 indique que la mobilité ionique est inversement proportionnelle à la température.

6.2.6 Migration du front acide et du front d'acétates

Comme à la section 6.1.3, on déterminera le moment et le lieu où la rencontre du front acide et du front d'acétates s'est produite. Les données obtenues seront utilisées pour étudier l'influence de la concentration initiale en métaux lourds, et l'influence du type de métal sur la migration des deux fronts. Par la suite, afin d'expliquer un fait particulier, on établira une relation entre le pH, la résistivité du sol et l'avancée du front d'acétates.

Les figures E.2(a), F.2(a) et G.6(a) montrent que les deux fronts se seraient rencontrés vers le centre de l'échantillon au cours des essais CB5, CB6 et CB7. En CB6 les fronts se seraient rencontrés à $t=40h$ alors qu'en CB5 et CB7 les fronts se seraient rencontrés à $t=42h$ et $t=168h$ respectivement. Par le biais de la figure 6.9 on constate que la charge unitaire (par kg de sol sec), requise pour amener les fronts à se rencontrer, a tendance à augmenter linéairement en fonction de la concentration initiale en plomb et en cuivre. Afin de vérifier cette tendance, il serait intéressant d'analyser des essais effectués avec un sol et des contaminants communs, et dont les écarts dans la concentration initiale sont grands. Toujours selon la figure 6.9, il semblerait que le type de contaminant influence la charge unitaire requise pour amener les fronts à se rencontrer.

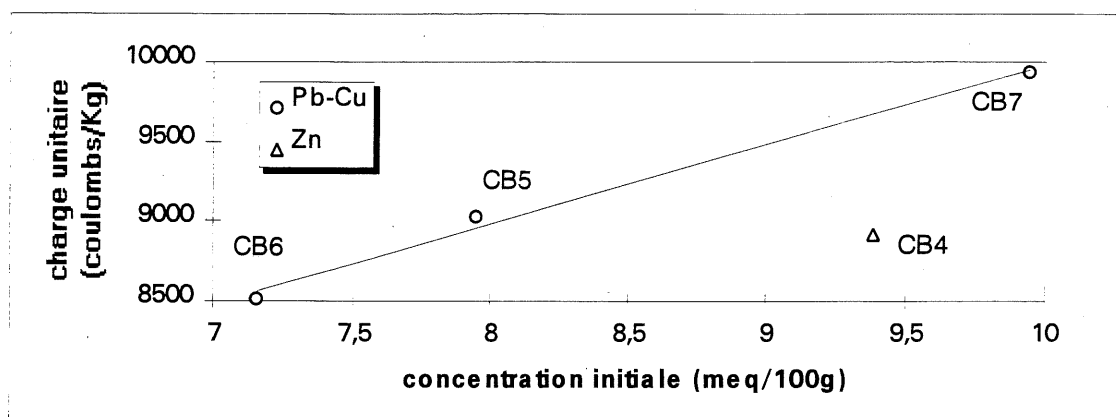


Figure 6.9 Influence de la concentration initiale sur la charge unitaire requise pour provoquer la rencontre du front acide et du front d'acétates

Selon le modèle proposé en 6.1.2, plus les concentrations initiales sont grandes, plus les concentrations des ions de remplacement devraient être grandes. Ainsi, plus les concentrations initiales sont grandes, plus les gradients électriques et les vitesses devraient être petits (à courant égal) au cours d'un essai. Il s'ensuit que la charge unitaire requise pour provoquer la rencontre des fronts devrait augmenter en fonction de la concentration initiale. Les données de la figure 6.9 sont donc cohérentes avec le modèle de la section 6.1.2.

Au tableau 6.4 on donne les valeurs de v_{OAc} , u^*_{OAc} et τ_{aOAc} pour les essais CB5 à CB7. Parce que la densité de courant de l'essai CB7 était plus faible que celle des essais CB5 et CB6, la

vitesse du front d'acétates était plus petite en CB7. On remarque aussi que la mobilité des acétates était plus grande dans le cas des essais CB1 à CB4 que dans le cas des essais CB5 à CB7.

Tableau 6.4 Paramètres reliés à la migration du front d'acétates

essai(s)	V_{OAc} (cm/s)	u^*_{OAc} (cm ² /V·s)	τ_{aOAc}
CB5 et CB6	$5,8 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-5}$	0,06
CB7	$3,4 \times 10^{-5}$	3×10^{-5}	0,07

Dans le cas des essais CB5 à CB7, l'avancée du front acide est difficile à caractériser tant par les résistivités que par les pH. Par exemple, les données intermédiaires de l'essai CB7, à $t=114$ heures (tableau G.2), auraient dû permettre de positionner clairement le front acide. Au contraire, les valeurs du pH dans les zones adjacentes à l'anode sont relativement élevées, et ne contrastent pas beaucoup avec la valeur initiale du pH. Pourtant, la combinaison nitrates et ions H^+ aurait dû faire diminuer le pH du sol parce que l'acide nitrique est un acide fort. BEAULIEU (1995) a observé une situation similaire lors d'essais contrôlés avec de l'acide nitrique. Au terme de ces essais, les pH oscillaient généralement autour de 4 et une valeur moyenne de 5,21 a même été enregistrée dans la zone 42-43, à la fin d'un essai.

Tableau 6.5 Remplacement des nitrates dans la tranche 42-43

essai	R_{fV1-V2} (ohm·cm)	$R_{fV1-réservoir}$ (ohm·cm)	pH ₄₂₋₄₃	pH ₄₀₋₄₁
CB5	4757; <u>en progression</u>	38→111	5,14	3,84
CB6	3313; <u>en progression</u>	53→72	5,35	3,94
CB7	5514; <u>stable</u>	18→637	3,09	3,23

Des pH semblables à cette dernière valeur ont été mesurés à la fin des essais CB5 et CB6. Respectivement, des pH moyens de 5,14 et 5,35 ont été enregistrés dans la zone 42-43. Ces pH sont étonnants parce qu'ils sont élevés et parce qu'ils provoquent un saut dans les profils de pH (figures E.1(c) et F.1(c)). Un autre fait surprenant est que, à la fin de l'essai CB7, le pH de la zone 42-43 était de 3,09.

L'analyse du tableau 6.5 permet d'avancer que, contrairement à l'essai CB7, les acétates n'auraient pas complètement franchi la zone V1-V2 à la fin de CB5 et CB6. Étant donné que la zone V1-V2 chevauche à peine la zone 42-43, on peut dire que le front d'acétates n'aurait pas pénétré la zone 42-43 dans le cas de CB5 et CB6. En CB7, la résistivité finale dans la zone V1-réservoir est relativement élevée et stable, cela indiquant que le front d'acétates aurait parcouru un bout de chemin dans la zone 42-43. On conclut que, contrairement à l'essai CB7, les nitrates n'auraient pas été évacués de la zone 42-43 lors des essais CB5 et CB6. Les pH élevés de ces deux essais s'expliqueraient alors par la présence des nitrates dans la zone 42-43. Peut-être faudrait-il revoir la technique utilisée pour établir le pH du sol car les nitrates semblent bel et bien avoir contribué à faire diminuer le pH du fluide anodique au cours des essais CB5 à CB7 (tableaux E.5, F.5 et G.6).

6.2.7 Migration du plomb et du cuivre

L'échantillonnage intermédiaire, fait pendant l'essai CB7 à $t=114h$, donne des renseignements sur le mode de migration des métaux lourds. Sans qu'on y fasse référence explicitement, les figures G.5(a) et G.5(b) seront utilisées dans la discussion qui suit. À $t=114h$ on voit que les concentrations en métaux lourds avaient diminué considérablement dans les zones 42-43, 40-41 et 32-33. En prenant la vitesse du front acide égale à celle du front d'acétates, on calcule que le front acide devait être à environ 14cm du réservoir anodique, soit vers l'extrémité «cathode» de la zone 32-33. Ainsi, en accord avec le modèle de la section 6.1.2, les métaux lourds auraient été «poussés en bloc» par le front acide. D'ailleurs, la présence du front acide dans les zones 42-43, 40-41 et 32-33 ne fait aucun doute puisque même si les métaux lourds étaient pratiquement disparus, les résistivités étaient plus basses qu'au départ.

Du côté de la cathode, les métaux lourds n'ont pas migré comme un bloc de concentration uniforme, possiblement en raison du gradient électrique qui a augmenté graduellement de la cathode vers l'anode en début d'essai. Par conséquent, il est fort probable que la concentration des acétates pénétrant dans le sol n'était pas uniforme. On en conclut que le modèle de la section 6.1.2 n'est pas tout à fait convenable parce qu'il ne tient pas compte de l'évolution du gradient électrique.

6.2.8 Adsorption non spécifique du plomb et du cuivre

Un tableau semblable à celui de la section 6.1.4 montre que, tout comme le zinc, le plomb et le cuivre étaient faiblement liés au sol d'Ascot. Du cuivre s'est sorbé au sol au cours de l'essai CB6, mais il faut mentionner qu'initialement très peu de cuivre était sorbé.

Tableau 6.6 Désorption du plomb et du cuivre dans les zones de pH élevé

essai-zone	pH initial	pH final	plomb sorbé initialement (ppm)	plomb sorbé en fin d'essai (ppm)	cuivre sorbé initialement (ppm)	cuivre sorbé en fin d'essai (ppm)
CB5-21	4,84	4,85	2219	788	173	154
CB6-13	4,87	4,93	1590	727	15	176
CB7-11	4,72	4,85	1540	1060	362	121
CB7-13	4,72	4,86	1540	1031	362	184

6.3 Conclusion

Au cours de ce chapitre sept essais, réalisés avec du sol d'Ascot contaminé en laboratoire, ont été analysés. Les deux fils conducteurs de la discussion ont été l'essai de 100 litres et la migration ionique. Les conclusions relatives à ces deux sujets sont présentées dans ce qui suit.

6.3.1 Essai en cellule de 100 litres

Conception

Les caractéristiques techniques de l'essai CB7, présentées ici-bas, ont été déterminées à partir des essais CB1 à CB4:

- Recirculation du fluide cathodique.
- Utilisation d'électrodes réduites.

- Utilisation de géotextiles pour séparer le sol et les fluides de contrôle.
- Homogénéisation des fluides de contrôle cathodique et anodique en cours de traitement.

La recherche d'une teneur en eau initiale optimale a été faite avant de préparer le sol de l'essai CB7. La comparaison des essais CB5 et CB6 a permis de conclure que la teneur en eau initiale ne devrait pas influencer de façon significative l'efficacité d'un traitement par électrocinétique.

Analyse des résultats

La comparaison des résultats de l'essai CB7 et de l'essai CB5 a permis de soulever les points suivants:

- Le nombre de charges par unité de volume qu'il faut appliquer pour traiter un sol donné semble indépendant des dimensions de la cellule de traitement.
- L'énergie volumique nécessaire au traitement d'un sol donné est proportionnelle à la distance entre les électrodes, et est influencée par la densité de courant.
- La non-homogénéité verticale d'un traitement électrocinétique est probablement reliée à la non-homogénéité des fluides de contrôle. Cependant, l'homogénéisation des fluides apparaît comme une dépense d'énergie inutile dans un contexte où l'extraction globale détermine l'efficacité.

6.3.2 Migration ionique

Les essais CB1 à CB7 ont permis de mettre l'accent sur l'aspect migration ionique parce que la sorption des métaux lourds, et l'interaction du sol avec les ions introduits n'ont pas été dominants au cours de ces essais. Un modèle de migration ionique a été proposé pour les essais CB1 à CB4, et étendu aux essais CB5 à CB7. Ses grandes lignes sont les suivantes:

- Les ions initialement présents dans le sol migrent en bloc sous l'influence d'un gradient électrique.
- Les concentrations (en équivalents par litre) des ions de remplacement sont identiques à celles des ions remplacés.
- La rencontre du front acide et du front d'acétates engendre une augmentation prononcée de la résistivité [BEAULIEU, 1995], les ions H^+ et CH_3COO^- étant pratiquement exclusifs lorsqu'ils se rencontrent.

On a montré que les métaux lourds sont bel et bien «poussés», comme un bloc, par le front acide en provenance de l'anode. Il en découle que du côté de la cathode les anions sont probablement «poussés» de la même façon. Aussi, on a démontré que les ions initialement présents dans le sol peuvent être remplacés par des ions de mêmes concentrations. Cependant, il semble que la concentration des ions pénétrant dans le sol ne serait pas uniforme. Le fait de tenir compte de l'évolution du gradient électrique donnerait plus d'étoffe au modèle proposé.

Une conséquence des deux premiers points du modèle est que la charge unitaire, requise pour faire avancer les fronts d'une certaine distance, augmente avec la concentration initiale en métaux lourds. Les résultats expérimentaux ont effectivement démontré que la charge unitaire requise augmente avec la concentration initiale, appuyant ainsi les deux premiers points du modèle. Aussi, il semble que le type de contaminant influence l'avancée des fronts. Probablement que les deux premiers points du modèle pourraient s'appliquer au traitement d'autres sols où l'interaction du sol avec les ions introduits est faible.

L'hypothèse selon laquelle la rencontre du front acide et du front d'acétates engendre une augmentation prononcée de la résistivité est cohérente avec les données expérimentales des essais CB1 à CB7. En effet, on a établi des relations solides entre le pH, la résistivité du sol et la position des fronts. Probablement que le troisième point du modèle pourrait s'appliquer à tous les traitements qui impliqueraient le remplacement des ions déjà présents par des ions H^+ et des acétates.

Chapitre 7

Traitement de deux sols à forte teneur en carbonates

Les sols contenant beaucoup de carbonates constituent une classe à part en raison de leur comportement particulier durant un traitement par électrocinétique. Dans le présent chapitre, on compte principalement sur deux essais pour décrire le comportement de cette classe de sol, et pour proposer des stratégies de décontamination. L'essai CB8 réalisé avec le sol 4 est le sujet de la section 7.1 alors que l'essai CB12 réalisé avec le sol de Coaticook est le sujet de la section 7.2. La section 7.3 présente les conclusions issues de l'analyse des essais CB8 et CB12.

7.1 Traitement d'un sol industriel par voie acide

On peut qualifier la stratégie employée lors de l'essai CB8 de stratégie acide. En effet, suite à une sévère préacidification à l'acide chlorhydrique (HCl), ajoutant au sol 4 environ 2,5 moles d'ions H^+ par Kg de sol sec, la pénétration d'un front acide a été favorisée lors du traitement électrocinétique. À la cathode, le pH a été contrôlé entre 3,5 et 4,2 à l'aide de l'acide acétique, sauf lors des 48 premières heures où l'acide chlorhydrique fut utilisé.

Le choix du type de préacidification a été fait en accord avec les résultats présentés au tableau 5.4. Selon ces résultats, c'est l'acide chlorhydrique pur qui a été le plus efficace pour solubiliser les métaux lourds. Suite à la préacidification à l'acide chlorhydrique, le pH du sol était de 5,88 en accord avec le tableau 5.4 (essais de préacidification), et de 5,39 en accord avec le tableau H.1 (essai CB8). D'autre part, la courbe tampon du sol 4 (figure 3.6) montre que le pH du sol devrait se situer entre 5,2 et 5,5 lorsqu'on ajoute 2,5 moles d'ions H^+ par Kg de sol sec

(HCl). Dans ce cas, il est donc intéressant de constater que le pH du sol semble indépendant de la teneur en eau (la teneur en eau du sol étant de 200% lors d'un essai tampon).

La préacidification a permis de faire passer la concentration moyenne en plomb et en zinc dans l'eau des pores de 0 à 33 456ppm et de 0 à 2143ppm respectivement (tableau H.1). Par rapport au sol, cela représente une concentration de 7,5meq/100g de métaux lourds solubles. Le traitement électrocinétique a été peu efficace si on considère qu'il a permis d'extraire une quantité de métaux lourds (Pb et Zn) ne correspondant qu'à une concentration de 3,2meq/100g, et ce pour une consommation d'énergie de 4791wh/litre. En comparaison, 25 fois moins d'énergie a été nécessaire pour extraire 2,25 fois plus de métaux lors de l'essai CB5 réalisé avec le sol d'Ascot. Malgré tout, la concentration en plomb a passé sous le critère B du MENVIQ dans la zone 40-41, et sous le critère C dans la zone 42-43. Aussi, la concentration en zinc a passé sous le critère B dans les zones 42-43, 40-41 et 32-33. Étant donné que le traitement a permis d'extraire moins que la moitié des métaux lourds solubilisés par la préacidification, on est en droit de se demander si la préacidification était vraiment utile dans ce cas. On reviendra sur cette question aux sections 7.1.4 et 7.1.5 reliées à la préacidification. Alors que la section 7.1.1 fait suite aux discussions du chapitre six, les sections 7.1.2 et 7.1.3 sont plutôt dédiées à l'étude du comportement des carbonates face à l'acidification causée par le traitement électrocinétique.

7.1.1 Avancée du front d'acétates

Lorsqu'on examine attentivement le tableau H.6 on se rend compte que, dans les 450 premières heures du traitement, la résistivité a augmenté légèrement et successivement en V5-V4, V4-V3 et V3-V2. Sur la base du modèle soumis au chapitre précédent, on suppose que cette augmentation progressive de résistivité a coïncidé avec la pénétration d'un front d'acétates. Le pH initial du sol, ainsi que les équations 2.7 et 2.8 indiquent que les ions H^+ introduits par la préacidification ont été neutralisés, puis remplacés par des ions Ca^{2+} . Étant donné que l'acétate de calcium est un composé complètement dissocié, on comprend pourquoi la pénétration des acétates n'aurait causé qu'une légère augmentation de résistivité.

En se basant sur le tableau H.6, on a calculé que la vitesse des acétates (appendice 1) était de $8,2 \times 10^{-6} \text{cm/s}$ avant qu'il se produise une augmentation subite de résistivité en V1-V2. De

plus, la mobilité ionique apparente ainsi que le coefficient de tortuosité apparente étaient de $1,9 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ et 0,04 respectivement. On a construit le tableau 7.1 pour comparer la vitesse du front d'acétates de l'essai CB8 avec celles des essais CB1 à CB7. Étant donné que la vitesse de migration des acétates est fonction du courant, on a pris soin de normaliser les vitesses par rapport au courant. Le tableau montre que la vitesse normalisée du front d'acétates était 15,8 fois plus petite en CB8 qu'en CB1-CB7. Ce dernier fait est cohérent avec le modèle du chapitre 6 puisque la concentration initiale en anions était beaucoup plus grande en CB8 (tableau 7.1). D'ailleurs, la résistivité initiale était 6,8 fois plus faible en CB8 qu'en CB1-CB7. La faible vitesse des acétates en CB8 était aussi due à la mobilité ionique apparente. En effet, la mobilité ionique apparente des acétates a été plus faible au cours de l'essai CB8 qu'au cours des essais CB1 à CB7.

Tableau 7.1 Comparaison des vitesses de migration des fronts d'acétates

groupe	courant (A)	$V_{\text{OAc-migration}}$ normalisée (cm/s·A)	estimé de la concentration initiale en anions (c_i) (meq/100g)	R_i (ohm·cm)	u_{OAc}^* (cm ² /V·s)
CB1 à CB4	0,125	5×10^{-4}	9,48	455	$5,3 \times 10^{-5}$
CB5 et CB6	0,125	$5,9 \times 10^{-4}$	7,56	217	$2,7 \times 10^{-5}$
CB7	0,086	$5,2 \times 10^{-4}$	9,94	188	3×10^{-5}
moyenne CB1 à CB7		$5,4 \times 10^{-4}$	9	349	
CB8	0,25	$3,3 \times 10^{-5}$	251*	51	$1,9 \times 10^{-5}$
rapport					
CB1-CB7/CB8		15,8		6,8	

* on suppose que la concentration initiale en anions dans le sol correspond aux ions Cl^- introduits lors de la préacidification

7.1.2 Texture du sol en fin d'essai

À la fin de l'essai, le sol avait une texture bien particulière à la zone où il était situé. La figure 7.1 permet de suivre la description du sol en fin d'essai. À droite de la ligne «fin d'essai» le sol était très mou et se comportait comme une argile sensible. C'est à dire que le sol devenait un liquide visqueux lorsqu'il était remanié. Le long de la ligne «fin d'essai» le sol était très dur dans une bande d'environ 2cm de largeur. Des mottes dures ainsi que des cristaux blancs

étaient présents, et on pense que ces cristaux étaient composés de calcite (CaCO_3) étant donné leur dureté, leur couleur blanche et la grande disponibilité des ions Ca^{2+} et CO_3^{2-} . On pouvait d'ailleurs apercevoir des cristaux blancs dans la région de l'anode aux premiers jours de l'essai. Le sol à gauche de la ligne «fin d'essai» était dur, mais moins que celui présent le long de la ligne. Ce sol était truffé de granules dures qui étaient possiblement composées de CaCO_3 .

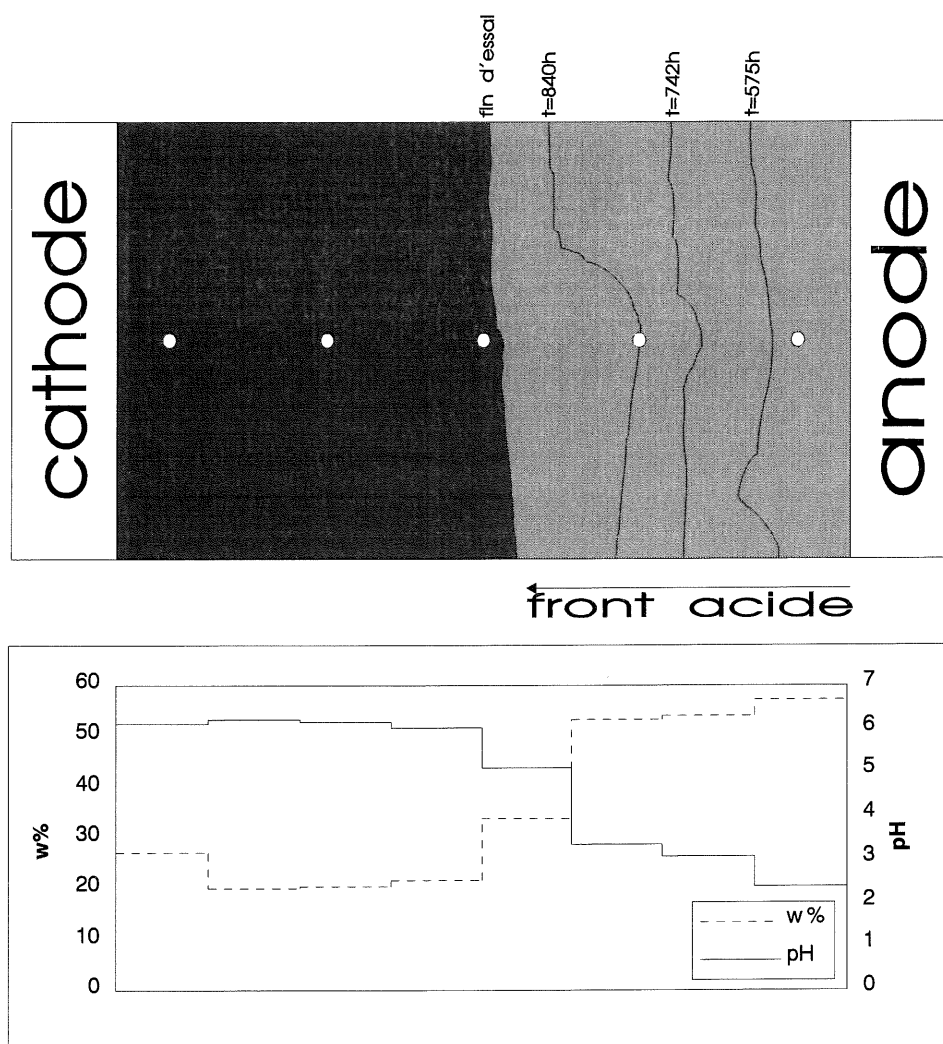


Figure 7.1 Progression du front acide et dissolution des carbonates

Une croûte de surface était présente de la ligne «fin d'essai» jusqu'à environ 1cm de la plaque de plastique séparant le sol du réservoir cathodique. Au début, la croûte n'était qu'un tapis de cristaux blancs qui par la suite se transforma en une croûte (des analyses chimiques ont

démontré que les concentrations en plomb et en zinc étaient faibles dans cette croûte) ayant des teintes de rouge et de brun. Il aurait été utile d'avoir un système permettant de recueillir aisément cette croûte afin d'éviter qu'elle se solubilise. Par exemple, une toile géotextile aurait permis d'enlever régulièrement la croûte sans toutefois retirer des grains de sol.

7.1.3 Effet du front acide sur les carbonates, les métaux lourds et la résistivité

La figure 7.1 montre les lignes en arrière desquelles le sol a passé d'un gris foncé à gris pâle, et ce, à différentes étapes du traitement. La figure 7.1 donne aussi les teneurs en eau ainsi que les pH du sol à la fin du traitement. À gauche de la ligne «fin d'essai» le pH du sol était à peu près constant à 6,1 et il était plus grand que le pH initial (5,39 après la préacidification). À droite de la ligne «fin d'essai» le pH diminuait graduellement vers l'anode jusqu'à une valeur moyenne de 2,41 dans la tranche 42-43. Il est clair que le front acide n'avait pas franchi la moitié de l'échantillon à la fin de l'essai.

À gauche de la ligne «fin d'essai» la teneur en eau du sol était voisine de la teneur en eau initiale ($w_{\text{moyen}} = 19,3\%$) sauf pour la tranche 10-11 où la teneur en eau moyenne était de 27,2%. À droite de la ligne «fin d'essai» la teneur en eau moyenne augmentait de 34% à 57,2%, de la zone 30-31 à la zone 42-43 respectivement. Il est important de noter que l'augmentation de la teneur en eau dans la demi-région anode n'a pas été accompagnée d'une augmentation apparente du volume du sol. On peut alors soutenir que les grains du sol avaient perdu de leur masse et qu'il est fort probable que cette perte de masse était due à la dissolution des carbonates par le front acide. Aussi, les faibles concentrations finales que l'on a retrouvées dans les zones 42-43 et 40-41 indiquent que la dissolution des carbonates allait de pair avec l'extraction des métaux lourds. Ainsi, les mécanismes de sorption impliquant les carbonates étaient probablement dominants dans le sol 4.

La figure H.2(a) indique clairement que la résistivité a augmenté de façon abrupte dans la zone V1-V2 aux alentours de $t=450\text{h}$. Aussi, il semble que l'on peut associer cette augmentation de résistivité avec l'avancée du front acide car d'après la figure 7.1, on peut supposer que le front acide faisait son entrée dans la zone V1-V2 vers $t=450\text{h}$. Par la suite, à mesure que le front acide progressait, la résistivité a augmenté de façon constante en V1-V2

jusqu'à $t=800h$. À partir de ce moment, le front acide a progressé en V2-V3 comme l'indiquent les figures H.6(a) et 7.1. On constate que le front acide a progressé beaucoup plus lentement que le front d'acétates, et ce en raison de l'interaction entre les ions H^+ et les carbonates.

La relation de cause à effet entre la migration du front acide et l'augmentation de la résistivité s'explique encore par l'association des ions H^+ avec les acétates. En effet, à mesure que le front acide a dissous les carbonates, les ions H^+ seraient devenus, avec les acétates, les seuls ions présents dans la zone de dissolution. Aussi, il se peut que des ions CO_3^{2-} se soient associés aux ions H^+ pour faire augmenter la résistivité du sol car tout comme l'acide acétique, l'acide carbonique n'est pas complètement dissocié.

Au terme de l'essai CB8 le sol de la zone V1-V2 était pratiquement décontaminé et assez résistif. Si on avait poussé plus à fond le traitement du sol 4, on voit bien qu'un gaspillage substantiel d'énergie aurait pris place dans la zone V1-V2, puis dans la zone V1-V3, puis dans la zone V1-V4. Donc, pour espérer obtenir un traitement compétitif par voie acide (du moins lorsque l'acide de contrôle est de l'acide acétique) on peut dire qu'il serait impératif de trouver un moyen pour disposer du sol à mesure qu'il est décontaminé.

7.1.4 Formation de complexes suite à la préacidification

Selon le bilan de masse de l'essai CB8 (tableau H.8), on avait extrait 1210mg de plomb à la cathode et 730mg à l'anode après 456 heures de traitement. A priori, on ne s'attendait pas à extraire une telle quantité de métal à l'anode. Lorsqu'on examine les quantités de zinc extraites à $t=456h$, les résultats sont frappants. Alors que 809mg de zinc a été récupéré à l'anode, seulement 112mg a été récupéré à la cathode. En tenant compte du fait qu'il n'y a eu aucun débit électro-osmotique de la cathode vers l'anode pendant ces 456 premières heures, il est évident qu'une partie des métaux lourds solubles étaient sous forme de complexes de charge négative au début du traitement. D'ailleurs, les tableaux H.2 et H.3 ainsi que la figure H.1(a) montrent que les profils de concentration en plomb et en zinc progressaient de la cathode vers l'anode à $t=191h$. À $t=554h$, le plomb exhibait un profil similaire à celui observé à $t=191h$ alors que le zinc avait retrouvé un profil «normal». Cette dernière constatation indique que le zinc se serait libéré de ses complexes plus rapidement que le plomb.

On pose comme hypothèse que la grande quantité d'ions Cl^- introduite lors de la préacidification serait responsable de cette formation de complexes. À $t=500\text{h}$ environ, l'odeur de chlore à l'anode avait beaucoup diminuée, indiquant que la concentration en ions Cl^- dans l'eau des pores avait aussi beaucoup diminuée. Parallèlement, on a remarqué que la concentration en plomb dans le réservoir anodique était de 18ppm à $t=552\text{h}$, comparativement à 1173ppm à $t=456\text{h}$ (des données relatives au zinc ne sont pas disponibles). Ces derniers faits s'accordent aussi avec l'hypothèse selon laquelle le front d'acétates aurait «poussé» les ions négatifs vers l'anode. En effet, selon le calcul de vitesse fait à l'appendice 1, le front d'acétates devait se situer très près du réservoir anodique à $t=500\text{h}$.

HAHNE et coll. (1973) donnent les formules et les constantes permettant de déterminer, en fonction du pH et de la concentration en ions Cl^- , la fraction de chacune des formes de plomb et de zinc en solution. Les figures 7.2 (a) et (b) montrent les résultats du calcul des fractions solubles de plomb et de zinc en fonction d'un pH de 6 et d'une concentration en ions Cl^- allant de 10^{-4}M à 10M . Le pH du sol en début d'essai était voisin de 6 alors que l'acide chlorhydrique introduit lors de la préacidification avait une concentration de 12M . Le sol étant pratiquement sec avant la préacidification, la concentration en ions Cl^- dans l'eau des pores au début du traitement électrocinétique était probablement au-dessus de 1M . Les figures 7.2 (a) et (b) s'accordent avec les résultats obtenus lors de l'essai puisque la fraction de complexes négatifs est élevée lorsque la concentration en ions Cl^- est supérieure à 1M . Les formules et les constantes permettant d'obtenir les figures 7.2 (a) et (b) sont données à l'appendice 3.

HAHNE et coll. (1973) émettent cependant des réserves quant à ces dernières figures. Ils mentionnent que les distributions des fractions représentent seulement les effets des ions Cl^- et du pH et qu'elles ne doivent pas être vues comme des distributions absolues de n'importe quel système environnemental. Un modèle exact peut être préparé seulement si toutes les réactions sont connues. Ainsi, les figures 7.2 (a) et (b) ne représentent sûrement pas de façon exacte le système qui prévalait lors de l'essai CB8. Cependant, on comprend que l'association des ions Cl^- avec les métaux lourds est une réaction au déséquilibre créé par le surnombre des ions Cl^- .

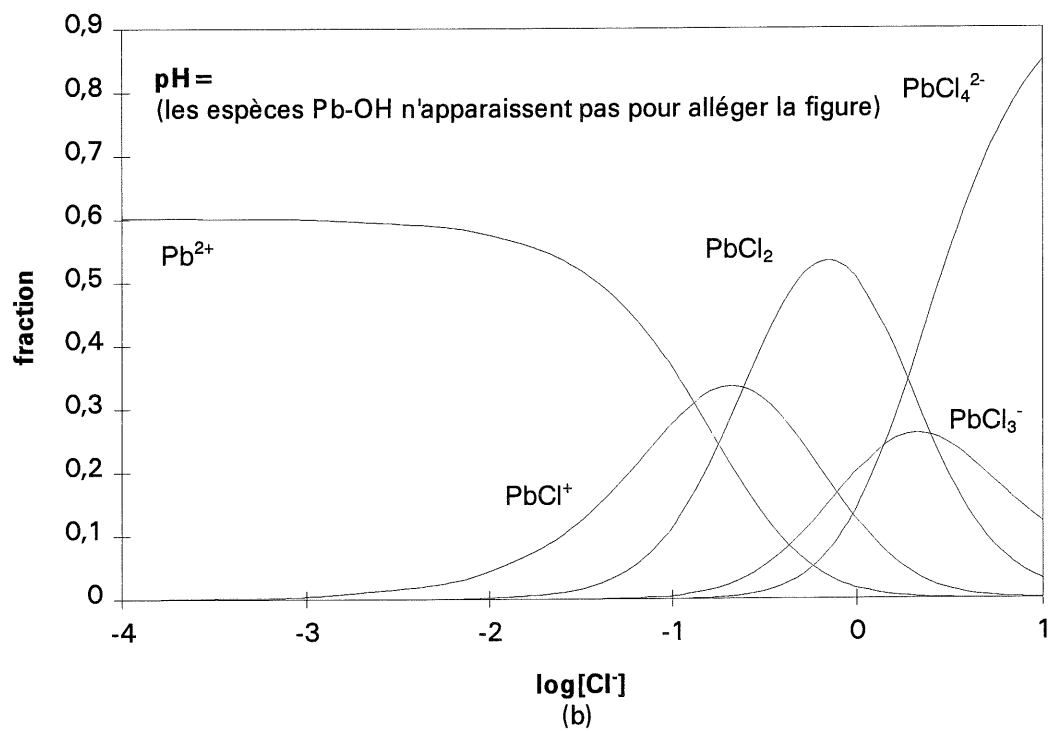
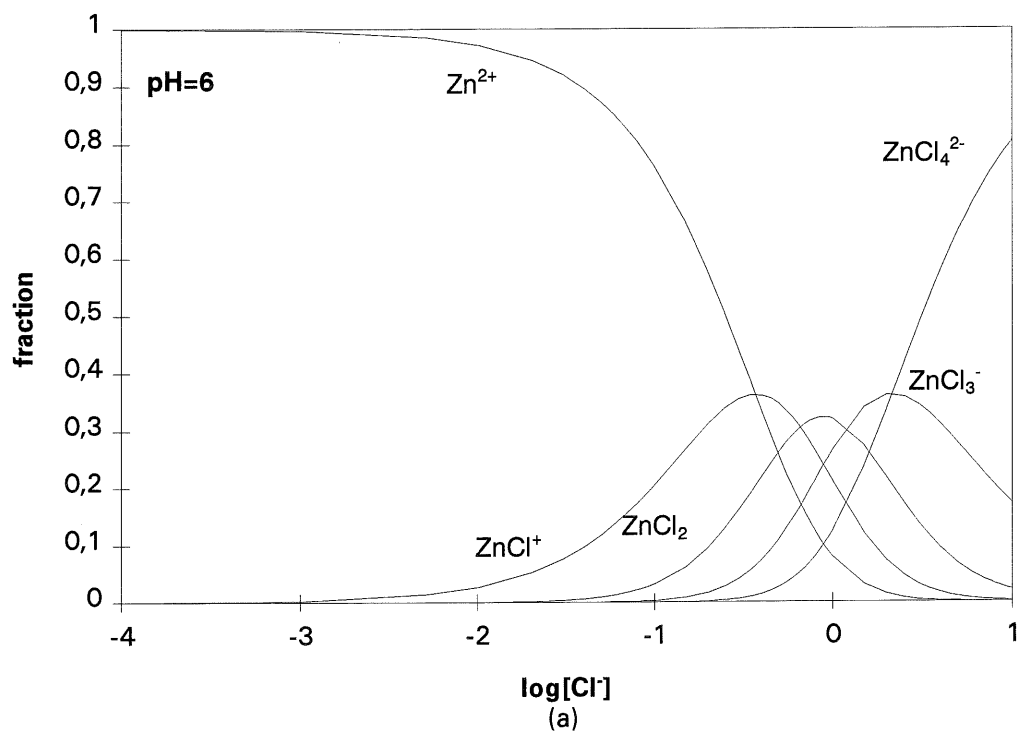


Figure 7.2 Complexes de zinc(a) et de plomb(b) formés suite à la précipitation

Probablement que la résistivité initiale du sol, ainsi que la vitesse du front d'acétates auraient été plus faibles si des complexes ne s'étaient pas formés lors de la préacidification. En effet, le nombre de charges à transporter aurait été plus grand car par exemple, la formation d'un complexe PbCl_4^{2-} annule deux charges positives et deux charges négatives. Pour éviter de former des complexes, la préacidification aurait dû se faire avec de l'acide chlorhydrique concentré à moins de 0,01M, mais une telle préacidification aurait eu peu d'effet (tableau 5.4).

7.1.5 Effets de la préacidification sur la décontamination du sol 4

Compte tenu de la section précédente, on peut dire que la préacidification a eu l'effet non désirable de faire migrer les métaux lourds vers l'anode avant que ces derniers ne reviennent vers la cathode. Les pertes de temps et d'énergie occasionnées par la préacidification sont difficiles à évaluer mais on peut en discuter à l'aide du tableau H.4. Selon ce tableau, on voit qu'en fin d'essai le plomb s'est accumulé dans les zones 30-31 et 22-23 alors que le zinc s'est accumulé dans les zones 22-23 et 20-21 situées plus près de la cathode. Ce décalage exprime que le zinc aurait eu plus de temps pour migrer vers la cathode, en accord avec le fait que le zinc se serait débarrassé plus rapidement des ions Cl^- . Cette explication semble pertinente puisque la mobilité ionique du plomb est plus grande que celle du zinc (tableau 2.3). Donc, on peut supposer qu'en l'absence de complexes la situation finale du zinc et du plomb aurait été meilleure que celle décrite par le tableau H.4. On conclut que la préacidification de l'essai CB8 était trop forte parce que de toutes façons, moins de la moitié des métaux lourds solubilisés par la préacidification ont été extraits.

Suite à l'analyse qui a été faite jusqu'à maintenant, il est clair que le traitement électrocinétique a contribué largement à la désorption du plomb et du zinc. Ainsi, on peut supposer qu'un traitement plus long aurait pu combler l'apport fait par la préacidification, et que cette dernière n'a fait qu'entraîner des coûts supplémentaires. Cependant, dans un cas comme le sol 4 où tous les métaux lourds sont initialement sorbés, un traitement sans préacidification aurait peut-être été très lent et très énergivore. Il semble que seule l'expérimentation pourrait permettre d'évaluer l'efficacité d'un traitement sans préacidification.

7.2 Traitement par voie non acide d'un sol artificiellement contaminé

Suite aux résultats peu concluants de l'essai CB8 et de sa stratégie acide, on a décidé de mettre à l'essai une stratégie différente pour traiter les sols à forte teneur en carbonates. Le choix de la stratégie s'est fait en fonction de l'essai CB8 mais aussi en fonction de quatre essais déjà réalisés par COUTURE (1994) avec du sol de Coaticook. En fait, on voulait éviter d'adopter une stratégie ayant déjà été mise à l'essai. Le tableau 7.2 résume les stratégies et les résultats des quatre essais déjà réalisés par COUTURE (1994).

La stratégie de l'essai IX était intéressante même si elle n'a pas été efficace. Lors de cet essai, on a utilisé un agent complexant puissant (NaEDTA) à la cathode pour favoriser le transport du plomb (sous forme de complexe de charge négative) de la cathode vers l'anode. Le plomb a en effet été déplacé de la cathode vers l'anode mais il n'a pas été extrait. Pour les essais VI, VII et VIII, on a opté pour une acidification du sol à l'anode sans faire le contrôle du pH à la cathode. Alors que les carbonates ont limité l'avancée du front acide, les ions OH^- ont eu le chemin libre. En effet, le pH moyen du sol était situé entre 9 et 12 à la fin des trois essais. Les essais VI, VII et VIII n'ont pas été très concluants, comme en témoignent les faibles taux d'extraction présentés au tableau 7.2, mais l'énergie consommée lors de ces essais fut faible et certaines des caractéristiques de l'essai VII sont intéressantes. On analysera plus à fond les résultats de l'essai VII à la section 7.2.4. Pour le moment, on rappelle que le but de l'essai CB12 était d'expérimenter une nouvelle stratégie.

Au chapitre 2, on a vu que l'acétate de sodium (NaOAc) peut être utilisé pour extraire les métaux lourds de la phase «carbonates» lors d'une extraction séquentielle [TESSIER et coll. cités par YONG et coll., 1993]. Dans le cadre de l'essai CB12, on a voulu provoquer la désorption des métaux lourds en favorisant la formation d'acétate de sodium dans les pores du sol de Coaticook, et ce sans opposer un front acide aux carbonates. En fait, il n'est pas évident que la solubilisation de tout le calcium soit indispensable à l'extraction des métaux lourds et par surcroît, l'association des ions H^+ avec les ions CH_3COO^- augmente la résistivité du sol. Les acétates ont été fournis par l'acide acétique présent à la cathode alors que le sodium a été fourni par l'acétate de sodium utilisé pour le contrôle à l'anode. On aurait pu utiliser du NaCl ou du NaOH à l'anode mais on voulait garder un pH assez élevé et assez stable dans le réservoir. Tout

Tableau 7.2 Essais réalisés sur le sol de Coaticook par COUTURE (1994)

essai	contrôle à la cathode	contrôle à l'anode	gradient électrique (V/cm)	courant moyen (mA)	durée (heures)	charge (C/litre)	énergie consommée (Wh/litre)	concentration initiale en plomb (ppm)	concentration finale minimale en plomb (ppm)	extraction (%)	pH moyen final
VI	H ₂ O	NaCl 1M	0,75	80	140	38 400	137	1500	1000 (pH=5,5) (anode)	0	12
VII	H ₂ O	HCl 0,1N	0,75	8,5	1110	33 333	119	1250	250 (pH=5,5) (du réservoir anodique jusqu'en V1) [Ca ²⁺] _f = 250ppm	5	10,5
VIII	HNO ₃ 0,1N (cathode en contact avec le sol)	HCl 0,1N	0,75	8,8	1038	31 619	113	1250	750 (pH=7) (anode)	5	9
IX	NaEDTA 0,1M	NaCl 0,5M	0,75	24,6	501	42 910	153	1300	700 (pH=11) (cathode)	0	11

source: COUTURE, C. (1994) *Efficacité comparative de l'électrocinétique et d'un simple lessivage pour le traitement des sols contaminés au plomb*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 204p.

au long de l'essai, le pH a été maintenu entre 3,7 et 5,48 à l'anode alors qu'à la cathode, le pH a été maintenu entre 3,03 et 4,21. Grâce à ce contrôle, il a été possible de maintenir un pH à peu près neutre dans le sol (tableaux I.2 et I.3).

Avant le début de l'essai CB12, une légère quantité d'acide acétique a été ajoutée au sol (0,16 mole d'ions H^+ /Kg de sol sec). Le tableau I.1 montre que cette opération a permis la solubilisation de 60% du cuivre et de 37% du plomb (avant la préacidification tous les métaux lourds étaient fixés au sol). Au tableau 5.5, on constate avec surprise que l'ajout de 0,5 mole d'acide chlorhydrique par Kg de sol sec a permis la solubilisation de seulement 1,2% du cuivre et 1,6% du plomb. Pourtant, le sol utilisé pour les tests de préacidification a été préparé d'une façon absolument identique au sol de l'essai CB12. Un autre fait curieux que l'on peut observer au tableau 5.5 est le suivant: pour l'acide chlorhydrique et le mélange acide nitrique et acide chlorhydrique, le pH du sol a augmenté lorsque la quantité d'acide ajoutée a passé de 0,08 à 0,5 mole d'ions H^+ /Kg de sol sec. On s'attendait plutôt à une diminution du pH.

La comparaison des tableaux I.1 et I.4 montre que 39% du cuivre et seulement 1% du plomb auraient été enlevés à l'issue du traitement. Cependant, les concentrations initiales en cuivre et en plomb étaient probablement plus grandes que 1128ppm et 3484ppm respectivement. En fait, les concentrations initiales auraient dû être les mêmes que celles des essais de préacidification (1359ppm de cuivre et 4945ppm de plomb). Selon le bilan de masse présenté au tableau I.8, 48% du cuivre et 23% du plomb auraient été enlevés du sol. Ces derniers taux d'extraction sont probablement les plus réalistes.

Le déroulement de l'essai CB12 s'est fait en trois volets successifs qui seront l'objet des sections 7.2.1 à 7.2.3: de $t=0$ à $t=124,5h$ le contrôle à l'anode s'est fait avec de l'acétate de sodium, de $t=124,5h$ à $t=146h$ le contrôle à l'anode s'est fait avec de l'eau du robinet, et de $t=146h$ à $t=191h$ le contrôle à l'anode s'est fait avec de l'acétate de calcium. À la section 7.2.4 on tentera de prévoir quel aurait été le comportement du sol de Coaticook si on l'avait traité par voie acide.

7.2.1 Effet de la préacidification et du contrôle à l'acétate de sodium

La préacidification a permis d'obtenir une résistivité moyenne initiale relativement basse (178ohm·cm), comparable à celle des essais CB5 à CB7 mais plus haute que celle de l'essai CB8 (51ohm·cm). Ainsi, la résistivité initiale du sol de l'essai CB12 était seulement 3,5 fois plus grande que celle du sol de CB8, même si environ 16 fois plus d'ions ont été préintroduits en CB8. Partant de ce fait, il semble que l'on peut obtenir une faible résistivité initiale sans pour autant ajouter une énorme quantité d'acide lors d'une préacidification.

Durant les 124,5 premières heures du traitement, le sodium a migré de l'anode vers la cathode sans que la résistivité du sol en soit affectée. Comme l'acétate de sodium est un composé complètement dissocié, ce type de comportement était à prévoir. On peut estimer que le front d'ions Na^+ était situé vers le centre de l'échantillon après 100 heures de traitement. En effet, seuls les pH des régions de l'anode et du centre avaient augmenté à $t=100\text{h}$ (tableaux I.1 et I.2). Comme en témoigne le tableau I.2, la migration du sodium a eu pour effet d'abaisser les concentrations en cuivre (411ppm) et en plomb (2751ppm) dans la région de l'anode. Par conséquent, on conclut que les ions Na^+ ont favorisé la migration des métaux lourds sans provoquer une augmentation de la résistivité. Cela est un avantage par rapport aux ions H^+ car lorsqu'une zone de sol est décontaminée on ne veut pas qu'elle devienne trop résistive.

Durant tout l'essai CB12, le pH du sol a été maintenu à des valeurs relativement élevées pour empêcher la dissolution des carbonates. Par contre, d'après le tableau I.3 cet objectif n'a pas été atteint car environ la moitié du calcium aurait été extrait uniformément. Aussi, il est possible que ce contrôle ait défavorisé la désorption des métaux lourds au cours de l'essai et ainsi, peut-être qu'il aurait été plus profitable de contrôler le pH du réservoir anodique à des valeurs plus basses. Une telle stratégie pourrait être qualifiée de semi-acide en ce sens qu'une certaine acidification du sol prendrait place pour aider à la désorption, et que l'introduction d'ions Na^+ permettrait de maintenir la résistivité du sol à un niveau acceptable.

7.2.2 Effet du contrôle à l'eau du robinet

Après 124,5 heures de traitement, le dépôt métallique à la cathode était visiblement stable indiquant que les métaux lourds ne parvenaient plus à sortir du sol. Alors, dans le but de promouvoir le mouvement des métaux lourds, on a décidé de faire circuler très rapidement de l'eau du robinet à l'anode (de $t=124,5h$ à $t=146h$). Le tableau I.2 montre que l'effet de ce régime n'a pas été dramatique car de $t=100h$ à $t=146h$ la concentration en cuivre a diminué de seulement 13ppm dans la région anode, alors que la concentration en plomb a diminué de 538ppm dans la même région. Aussi, il est possible que ces diminutions de concentrations aient été le résultat du contrôle à l'acétate de sodium de $t=100h$ à $t=124,5h$.

Comparativement à l'acétate de sodium, l'eau du robinet est très résistive et c'est pourquoi la résistivité a augmenté dramatiquement dans les zones réservoir-anode et V1-réservoir (tableau I.6). L'effet de l'eau s'est aussi fait sentir dans le sol entre les plots V1 et V2 où la résistivité a augmenté progressivement. Cette augmentation progressive laisse croire qu'un front d'ions H^+ a avancé de l'anode vers la cathode en remplacement des ions Na^+ , l'augmentation de la résistivité étant due à l'association des ions H^+ avec les acétates. Or, si on avait permis à l'eau de s'acidifier dans le réservoir anodique, probablement que la résistivité aurait progressé de la même façon en V1-V2. Étant donné la grande résistivité de l'eau du robinet, on peut dire que la circulation rapide de l'eau du robinet s'est traduite par une consommation inutile d'énergie dans le réservoir anodique.

7.2.3 Effet du contrôle à l'acétate de calcium

L'acétate de calcium semble avoir effectué un travail semblable à l'acétate de sodium puisque les concentrations en cuivre et en plomb ont continué à baisser de $t=146h$ à $t=191h$ (surtout dans les zones de l'anode et de la cathode). Dans le réservoir anodique, la résistivité a chuté à une valeur semblable à celle qui prévalait avant le contrôle à l'eau du robinet, et ce dès l'ajout de l'acétate de calcium (tableau I.6). En V1-V2, la résistivité a diminué progressivement jusqu'à $t=191h$ alors qu'en V2-V3, V3-V4 et V4-V5 la résistivité a augmenté légèrement et successivement de $t=152h$ à $t=191h$. Ainsi, on croit qu'un front de calcium avait migré jusqu'au réservoir cathodique ou tout près de celui-ci à $t=191h$.

7.2.4 Traitement du sol de Coaticook par voie acide

Les résultats relatifs à l'essai VII permettent de voir que le comportement du sol de Coaticook est semblable à celui du sol 4 face à l'acidification (tableau 7.2). En effet, le front acide s'est installé dans une tranche allant du réservoir anodique jusqu'au plot V1 (pH=5,5), et du même coup la concentration en plomb a chuté à 250ppm. De plus, dans cette même tranche la concentration finale en calcium était aussi de 250ppm, ce qui indique que le front acide a dissous les carbonates et que le plomb était probablement lié aux carbonates.

Pour l'essai VII, une charge de 33 333C/litre a permis au front acide d'atteindre le plot V1 alors qu'une charge de 340 000C/litre a été nécessaire pour atteindre le même objectif en CB8 (figure 7.1 et tableau H.7). Par rapport au sol 4, on peut donc dire que, grossièrement, dix fois moins de charges, de temps et possiblement d'énergie seraient nécessaires à la décontamination du sol de Coaticook. Parallèlement, les courbes tampons de la figure 3.6 montrent que le sol de Coaticook a besoin de huit fois moins d'ions H^+ pour que le pH du sol s'abaisse à 4. À la lumière de ces résultats, il semble que la charge, l'énergie, et le temps requis pour décontaminer un sol à forte teneur en carbonates dépendraient de la teneur en carbonates.

7.3 Conclusion

Sur la base d'essais réalisés sur deux sols à forte teneur en carbonates, on a observé qu'un traitement électrocinétique par voie acide permet d'abaisser les concentrations en métaux lourds à des valeurs acceptées par le MEF. Cependant, la quantité d'énergie, la charge, et le temps nécessaires à la décontamination peuvent être considérables, et ils dépendent possiblement de la teneur en carbonates. À l'avenir il serait intéressant d'établir, avec plusieurs sols, une relation entre la teneur en carbonates, l'énergie, la charge et le temps nécessaires à la décontamination. Cependant, avant de faire cela il faudra, par le biais de la recherche, établir une stratégie commune qui serait la plus efficace. À la section 7.3.2 on propose des stratégies qui, selon l'auteur, devraient contribuer à améliorer l'efficacité du traitement des sols à forte

teneur en carbonates. Auparavant, on résume les faits sur lesquels les stratégies de la section 7.3.2 ont été établies.

7.3.1 Caractéristiques de traitement reliées aux carbonates et migration ionique

- Pour les deux sols testés, la désorption et l'extraction des métaux lourds ont passé par la dissolution et l'évacuation des carbonates.
- Suite à la dissolution des carbonates, une croûte peut se former à la surface du sol. L'enlèvement de cette croûte devrait être bénéfique au traitement.
- Dans le cas d'un essai contrôlé à l'acide acétique, la résistivité du sol augmente dans les zones décontaminées. Donc, le fait d'enlever le sol à mesure qu'il est décontaminé devrait mener à une technologie plus économique lorsqu'on parle d'énergie.
- Par opposition aux ions H^+ , les ions Na^+ et Ca^{2+} , en association avec des acétates, permettent au sol de conserver sa résistivité initiale. Cependant, l'introduction d'acétate de sodium en cours d'essai s'est avéré une stratégie plus ou moins efficace, possiblement parce que le pH du réservoir anodique était trop élevé.
- Une préacidification avec de l'acide chlorhydrique concentré est inutile et même indésirable parce que les ions Cl^- forment des complexes avec les métaux lourds. D'ailleurs, on a vu que la préacidification n'est peut-être pas essentielle à la décontamination des sols contenant beaucoup de carbonates. D'autre part, l'acide acétique semble être beaucoup plus efficace que l'acide chlorhydrique dans un contexte de préacidification.
- La préacidification de l'essai CB8 a permis de faire ressortir le fait que l'ajout d'une grande quantité d'ions provoque la diminution de la résistivité initiale, du gradient électrique et par conséquent de la vitesse des ions. En effet, on a mesuré que la vitesse normalisée du front d'acétates était environ seize fois plus petite en CB8 qu'en CB1-CB7.

7.3.2 Stratégies proposées

Afin de poursuivre le développement de la technologie électrocinétique face aux carbonates, on recommande que les essais à venir soient effectués avec du sol de Coaticook parce qu'il contient moins de carbonates que le sol 4, et qu'ainsi les temps de traitement seraient plus courts. La meilleure des stratégies pourrait ensuite être mise à l'essai sur le sol 4 ou un autre sol industriel ayant une forte teneur en carbonates. Au cours des essais suggérés plus bas, la pose d'un géotextile à la surface du sol devrait être faite pour permettre de recueillir la croûte superficielle:

- 1- Traitement par voie acide: CH_3COOH à la cathode et préacidification avec CH_3COOH ou NaOAc ($\text{pH}=5$). Considérer le fait qu'enlever le sol à mesure qu'il est décontaminé serait bénéfique.
- 2- Traitement par voie acide: HCl à la cathode et préacidification avec CH_3COOH ou NaOAc ($\text{pH}=5$).
- 3- Traitement par voie acide: HCl ou CH_3COOH à la cathode et sans préacidification.
- 4- Essai semblable à CB12, avec ou sans préacidification, mais avec un contrôle plus bas du pH à l'anode. En plus du NaOAc , le $\text{Ca}(\text{OAc})_2$, le NaCl ou le NaOH pourraient être utilisés à l'anode.

La comparaison des essais 1 et 2 permettrait de déterminer lequel des deux acides est le plus efficace. Aussi, on pourrait déterminer si la présence des ions Cl^- permet au sol de garder sa résistivité initiale dans les zones décontaminées. La comparaison de l'essai 3, avec l'essai 1 ou l'essai 2, permettrait de déterminer si la préacidification est profitable. Finalement, l'essai 4 permettrait de savoir si une stratégie à mi-chemin entre l'essai CB12 et une stratégie acide serait la meilleure solution.

Chapitre 8

Traitement d'un sol industriel contaminé au chrome

Le sol 5 est semblable au sol d'Ascot en ce sens que c'est un sable silteux ayant une faible capacité tampon. Cependant, le sol 5 contient beaucoup de chrome (environ 8000ppm) et il se pourrait que ce métal, par rapport au zinc, au plomb et au cuivre, se comporte d'une façon différente face à l'électrocinétique. En effet, le chrome est trivalent ou hexavalent dans un sol, ce qui n'est pas le cas du zinc, du plomb et du cuivre. Au chapitre 2, on a vu que le chrome trivalent se lie fortement aux sols, par opposition au chrome hexavalent qui est mobile. Dans le cas présent, le chrome serait donc trivalent puisqu'il est sorbé à 99% sur le sol (tel que reçu). Plus précisément, le chrome serait lié au sol 5 par une phase «hydroxyde» (voir chapitre 3).

Le sol 5 contient aussi une bonne quantité de plomb (près de 2000ppm) qui, tout comme dans le cas du chrome, est presque entièrement sorbé. Ce dernier fait est intéressant puisqu'il permettra de comparer le comportement du chrome avec celui du plomb, pour vérifier si le chrome confère au sol un comportement particulier. Pour atteindre cet objectif, on dispose des résultats de quatre essais qui permettront aussi de proposer des stratégies plus efficaces que les traitements acides utilisés. Les quatre essais se différencient par le type de préacidification et par l'acide de contrôle utilisé à la cathode. La section 8.1 regroupe les trois essais contrôlés à l'acide acétique (CB9, CB10 et CB13) alors que la section 8.2 traite de l'essai CB11 contrôlé à l'acide chlorhydrique. Comme pour les deux chapitres précédents, la dernière section présente les conclusions.

8.1 Traitements contrôlés à l'acide acétique

Le premier essai réalisé avec le sol 5 est l'essai CB9. Pour cet essai, on a choisi de préacidifier le sol avec de l'acide chlorhydrique parce que, lors des tests de préacidification (tableaux 5.6 et 5.7), cet acide s'est avéré plus efficace que l'acide nitrique pour solubiliser le plomb. On a mis fin au traitement après 162 heures parce que les taux d'extraction étaient devenus très faibles en raison de l'insolubilité des métaux lourds restant à extraire. Le traitement a permis d'extraire 57% du chrome dont 13,5% ont été désorbés en cours d'essai, et 61% du plomb dont 47% ont été désorbés en cours d'essai. Donc, à l'issue du traitement la concentration moyenne en chrome était encore assez élevée à 3687ppm.

Deux facteurs ont été identifiés pour expliquer l'insolubilité du chrome après un certain temps. Le premier facteur qui a peut-être favorisé la sorption du chrome est l'augmentation du pH en cours d'essai. Effectivement, le pH moyen du sol a augmenté de 2,55 à 3,79 suite au contrôle à l'acide acétique. On examinera ce facteur de plus près à la section 8.2. Le deuxième facteur est la possibilité qu'une certaine quantité de chlorure de chrome (CrCl_3) se soit formée suite à la préacidification. On a vu au chapitre 2 que le CrCl_3 est un composé considéré comme étant insoluble. Pour vérifier la pertinence de ce dernier facteur, l'essai CB10 a été mené avec un sol préacidifié à l'acide nitrique. L'essai CB10 a lui aussi conduit à une impasse puisqu'en fin d'essai la concentration moyenne en chrome était de 3574ppm, tout ce chrome étant pratiquement insoluble. On peut donc conclure que le CrCl_3 n'a probablement pas été responsable de l'immobilité du chrome en CB9. Aussi, on remarque que l'essai CB10 a permis l'extraction de seulement 25% de plomb même si, comparativement à l'essai CB9, la quantité d'énergie et le nombre de charges étaient supérieurs (tableau 5.3). En fait, ce comportement va de pair avec les résultats des tests de préacidification.

Au cours des essais CB9 et CB10, beaucoup de métaux lourds ont été extraits dans le réservoir anodique, et un débit électro-osmotique important a circulé de la cathode vers l'anode. Afin de contrer cette situation, on a tenté un essai avec un sol préacidifié avec une quantité relativement faible d'acide acétique. Les résultats de l'essai CB13 démontrent que cette stratégie

n'a pas été un succès parce que seulement 32% du chrome et 3% du plomb ont été enlevés du sol. De plus, un débit électro-osmotique important a tout de même circulé de la cathode vers l'anode.

8.1.1 Préacidification à l'acide chlorhydrique

Suite à la préacidification, l'eau des pores du sol 5 a passé d'un vert très pâle à un vert très foncé. Les espèces responsables de ce vert très foncé étaient probablement anioniques car le fluide du réservoir anodique est devenu vert foncé au cours de l'essai CB9. Aussi, la figure 8.1 illustre que le sol a perdu sa couleur vert foncé (pour devenir brun) de la cathode vers l'anode en cours d'essai. Le tableau J.7 montre que du chrome et du plomb se sont accumulés dans le réservoir anodique jusqu'à $t=113h$, soit le moment où la couleur vert foncé avait complètement disparu du sol. On peut donc affirmer qu'une fraction du chrome et du plomb était sous forme de complexes de charge négative en début d'essai, et que certains de ces complexes ont contribué à la couleur verte de l'eau des pores. Sur la base de l'essai CB8, on attribue la formation de complexes à la présence des ions Cl^- introduits au cours de la préacidification. D'ailleurs, il semble que les ions Cl^- étaient la seule source de complexes car, en accord avec le chapitre 2, des conditions acides ne favorisent pas la transformation du chrome trivalent en chrome hexavalent (ion CrO_4^{2-} par exemple). D'une façon ou d'une autre, la préacidification à l'acide chlorhydrique a engendré des complexes de charge négative.

La préacidification a aussi eu pour effet de procurer au sol une charge de surface positive car un débit électro-osmotique moyen de $2,7 \times 10^{-3} cm^3/s$ s'est manifesté de la cathode vers l'anode (figure J.3(b) et tableau J.6). Par conséquent, on pourrait croire que les métaux extraits dans le réservoir anodique ont été entraînés par le débit électro-osmotique même s'ils étaient de charge positive. Cette hypothèse semble invraisemblable puisque durant la période allant de $t=0$ à $t=113h$, du plomb et du chrome ont été extraits dans le réservoir cathodique. Le plomb extrait dans le réservoir cathodique s'est principalement retrouvé sous forme solide alors que le chrome a été extrait en majeure partie sous forme soluble. Le fluide du réservoir cathodique était d'un rouge vin plus ou moins foncé, en fonction de la concentration en chrome.

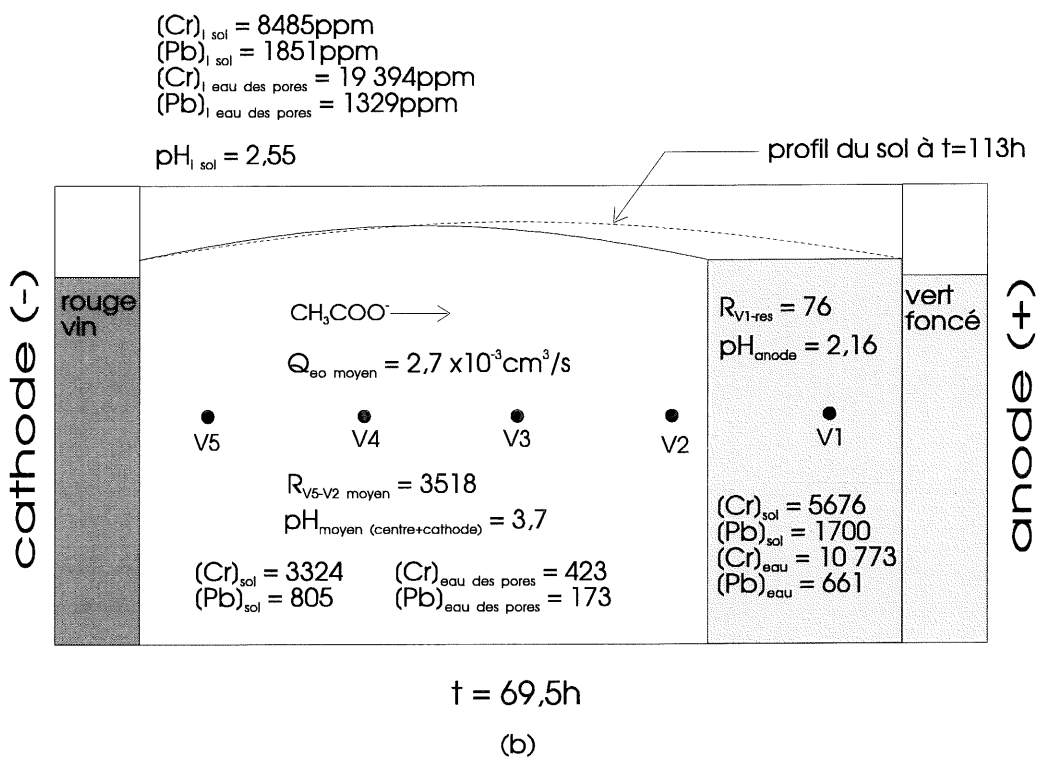
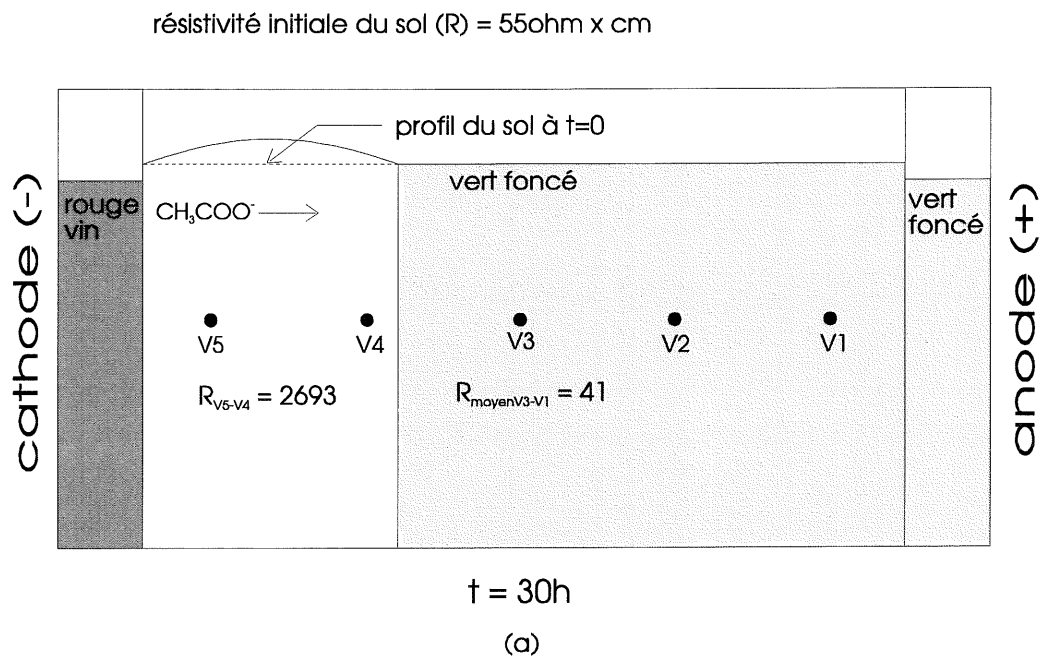


Figure 8.1 Progression du front d'acétates au cours de l'essai CB9: $t=30\text{h}$ (a) et $t=69,5\text{h}$ (b)

À l'appendice 1, on a calculé que la vitesse du fluide correspondant au débit électro-osmotique était de $1,1 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$, donc environ deux fois plus grande que la vitesse du front «poussant» le liquide vert foncé ($5,3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$). Ainsi, on constate que le gonflement du sol illustré sur la figure 8.1 n'était pas directement associé au débit électro-osmotique, mais plutôt à l'avancée du front en provenance de la cathode. Tout comme dans le cas des essais CB1 à CB8, on associe ce front à la migration des acétates provenant du contrôle à la cathode. Deux signes indiquent la présence des acétates en remplacement des ions Cl^- et des complexes négatifs. Premièrement, la figure 8.1 montre que la résistivité du sol était beaucoup plus grande que la résistivité initiale dans les zones où le front s'était installé. Ces augmentations s'expliquent en considérant que les acétates auraient réagi avec les ions H^+ déjà présents. Deuxièmement, la figure 8.1(b) montre que le pH moyen était de 3,7 dans la région occupée par les acétates, comparativement à un pH initial de 2,55 et un pH de 2,16 dans la région où le sol était encore vert foncé. On a fait le lien entre l'augmentation du pH et l'association des acétates avec les ions H^+ lors de l'analyse des essais CB1 à CB4.

La figure 8.1(b) montre aussi que les acétates auraient «poussé» en bloc les complexes de charge négative car l'avancée du front d'acétates a causé une diminution marquée des concentrations en chrome et en plomb dans l'eau des pores et le sol. Par exemple, à $t=69,5\text{h}$ la concentration en chrome à l'anode était de 5676ppm dans le sol et de 10 773ppm dans l'eau des pores. Au même moment, on retrouvait en moyenne 3324ppm de chrome dans le sol et 423ppm dans l'eau des pores au centre et à la cathode. Le tableau J.7 et la figure J.3(c) montrent qu'une quantité négligeable de chrome a été enlevée après 113 heures de traitement. Ainsi, aucune raison permet de croire que la stratégie de l'essai CB9 aurait permis d'abaisser la concentration en chrome sous le critère C à long terme. Cependant, il semble qu'une modification à cette stratégie pourrait mener à un traitement efficace. En effet, un test de postacidification à l'acide chlorhydrique, conduit sur un échantillon de la zone 42-43 (tableau 5.8), a permis de faire passer la concentration en chrome sorbé de 3121ppm à 1368ppm. D'autre part, ce test a permis de faire passer la concentration en plomb sorbé de 374ppm à 101ppm. Donc, une stratégie pouvant mener à un traitement efficace serait de suivre la procédure de l'essai CB9 jusqu'à $t=113\text{h}$, de réacidifier le sol à l'acide chlorhydrique et de procéder de nouveau comme en CB9.

8.1.2 Préacidification à l'acide nitrique

Tout comme en CB9, l'eau des pores a passé d'un vert très pâle à un vert très foncé suite à la préacidification du sol en CB10. Cependant, même si des quantités identiques d'ions H^+ ont été préintroduites pour les deux essais, le pH initial du sol était de 3,63 en CB10 comparativement à 2,55 pour l'essai CB9. Cette observation est surprenante mais elle concorde avec la section 6.2.6 où on a noté que la combinaison nitrates et ions H^+ entraîne des pH relativement élevés dans le sol.

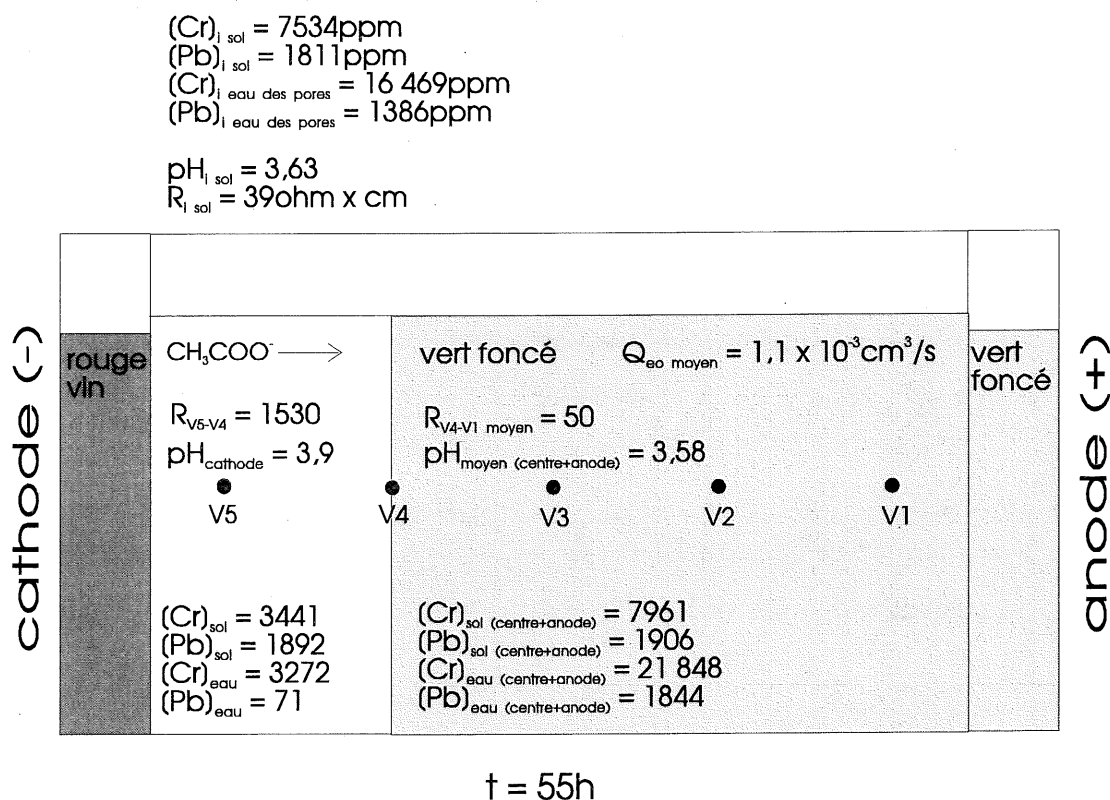


Figure 8.2 Progression du front d'acétates au cours de l'essai CB10: $t=55h$

De la même façon qu'au cours de l'essai CB9, des contrastes entre le pH, la résistivité, et les concentrations en métaux lourds permettent de caractériser l'avancée d'un front d'acétates en CB10. Avec l'aide de ces contrastes, la figure 8.2 montre que le front d'acétates avait

progressé jusqu'à la région du plot V4 après 55 heures de traitement. Aussi, on voit que le fluide cathodique était rouge vin comme dans le cas de CB9, mais que contrairement à CB9 le sol n'a pas gonflé. Une autre différence entre ces deux essais est que le débit électro-osmotique moyen était plus petit en CB10 ($1,1 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{s}$) qu'en CB9 ($2,7 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{s}$). Aussi, le passage de 50 218 coulombs (à $t=55\text{h}$) a mené le front d'acétates à environ 5cm du réservoir cathodique en CB10, alors qu'en CB9 le passage de 49 669 coulombs (à $t=69,5\text{h}$) a mené le front d'acétates à environ 12cm du réservoir cathodique. On explique cette dernière situation par le fait que la résistivité initiale du sol, et par conséquent le gradient électrique initial étaient plus faibles en CB10 qu'en CB9. En effet, la résistivité initiale du sol était de $55 \text{ohm}\cdot\text{cm}$ en CB9 et de $38 \text{ohm}\cdot\text{cm}$ en CB10.

Globalement, l'essai CB10 n'a pas permis d'extraire plus de chrome qu'en CB9 mais par contre, la concentration en chrome dans la zone 43 a été abaissée à 1934ppm (tableau K.3). Cette caractéristique est encourageante si on considère qu'en CB9 la plus basse concentration atteinte a été de 3082ppm.

8.1.3 Préacidification à l'acide acétique

Suite à l'ajout d'acide acétique dans le sol, l'eau des pores est devenue rouge vin, confirmant que la coloration du fluide cathodique des essais CB9 et CB10 était due à des complexes formés de chrome et d'acétates (le mélange plomb et acétates est incolore). Évidemment, le fluide cathodique de l'essai CB13 est lui aussi devenu rouge vin en cours de traitement.

Aucun indice permet de suivre la progression d'un front d'acétates puisque ceux-ci ont été introduits avant de démarrer l'essai CB13. Néanmoins, la résistivité du sol a augmenté successivement en V1-V2, V2-V3, V3-V4 et V4-V5 (tableau M.5 et figure M.2(a)), indiquant que les 3450ppm de chrome solubilisé auraient principalement migré de l'anode vers la cathode. Le bilan de masse de l'essai (tableau M.7) appuie cette hypothèse car selon celui-ci, 28% du chrome a été extrait à la cathode contre 9% à l'anode. Aussi, le tableau M.2 montre qu'il ne restait pas beaucoup de chrome soluble à $t=117\text{h}$, moment où la résistivité du sol était presque stabilisée d'un réservoir à l'autre.

8.2 Traitement contrôlé à l'acide chlorhydrique

De tous les essais du programme expérimental, l'essai CB11 est le seul qui n'a pas été contrôlé à l'acide acétique. Le choix de l'acide chlorhydrique comme acide de contrôle a été fait parce qu'au contact des ions Cl^- provenant du réservoir cathodique, les ions H^+ déjà présent dans le sol devraient rester libres (l'acide chlorhydrique est complètement dissocié). C'est donc dire que l'on voulait maintenir le pH du sol autour d'une valeur de 2 puisque suite à la préacidification à l'acide chlorhydrique, le pH moyen était de 1,98. On doit mentionner qu'avant de mettre le sol en place on a retiré, à l'aide d'une pipette, un surplus de liquide vert foncé présent à la surface du sol. C'est pour cette raison que la teneur en eau initiale de l'essai CB11 était de 16,3%, comparativement à 20,2% en moyenne pour les essais CB9, CB10 et CB13. Aussi, les concentrations initiales en chrome et en plomb étaient de 7352ppm et 1731ppm, comparativement à 8210ppm et 1935ppm en moyenne pour les trois autres essais.

Comme l'indiquent les tableaux L.2, L.3 et L.4, le contrôle à l'acide chlorhydrique a permis de maintenir le pH du sol assez près d'une valeur de 2. En effet, la plus haute valeur mesurée a été de 2,51, en fin d'essai dans la zone près de l'anode. Cependant, le maintien du pH à des valeurs basses n'a pas conduit à des taux d'extraction bien supérieurs à ceux de l'essai CB9, et on a arrêté le traitement pour la même raison qu'en CB9, CB10 et CB13. C'est tout de même à l'issue de l'essai CB11 qu'on a mesuré les plus basses concentrations moyennes en plomb (453ppm) et en chrome (3253ppm).

En conséquence du contrôle à l'acide chlorhydrique, on pouvait prévoir qu'un front d'ions Cl^- migrerait de la cathode vers l'anode, en remplacement des complexes de charge négative et des ions Cl^- déjà présents. La figure 8.3 illustre qu'un front a bel et bien avancé jusqu'au plot V4 durant les 55 premières heures du traitement. En effet, dans la zone délimitée par le réservoir cathodique et le plot V4, le sol a pâli et les concentrations en métaux lourds ont nettement diminué. Le fait que, dans cette région, la résistivité ait augmenté à seulement 255ohm·cm confirme la présence d'un front d'ions Cl^- . Effectivement, on sait que les ions H^+ et Cl^- sont complètement dissociés et forment ainsi un système relativement conducteur, contrairement à l'association des ions H^+ et CH_3COO^- . D'ailleurs, la résistivité finale du sol était

de 221ohm·cm en CB11, comparativement à 4583ohm·cm en CB9, même si les concentrations finales en métaux lourds solubles n'étaient pas plus grandes en CB11 qu'en CB9. Dans un autre ordre d'idées, la figure 8.3 montre que le fluide cathodique est devenu vert en cours de traitement. Donc, on en conclut que la couleur verte de l'eau des pores était due à des complexes de charge négative et de charge positive.

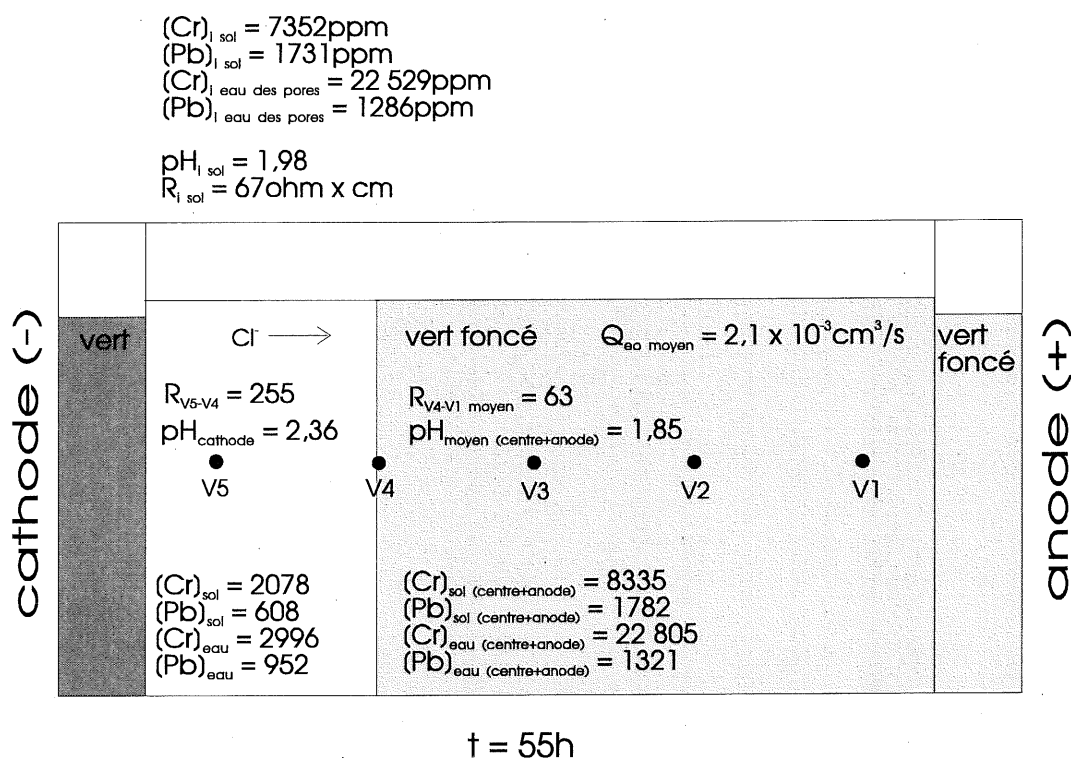


Figure 8.3 Progression du front d'ions Cl^- au cours de l'essai CB11: $t=55h$

À $t=55h$, la concentration en chrome sorbé était de 1477ppm à la cathode, alors que celle en plomb était de 417ppm dans la même région (tableau L.2). On aurait pu croire que ces résultats encourageants étaient reliés au fait que le pH du sol a été maintenu à une valeur de 2,36 à la cathode. Cependant, alors que le pH final était de 2,26 à la cathode, les concentrations finales en métaux lourds sorbés étaient de 3733ppm et 707ppm pour le chrome et le plomb respectivement. On ne peut pas fournir d'explications à ce phénomène de «resorption», mais on observe qu'il s'est produit pour le plomb et le chrome. Donc, ce fait indique que face à l'électrocinétique, le comportement du sol 5 serait relié à la phase adsorbante, plutôt qu'à la nature du chrome.

La figure 8.4 résume les tests de postacidification effectués suite à l'essai CB11 (tableau 5.8). Cette figure laisse croire que le comportement du sol 5 est bel et bien relié à la phase adsorbante car les courbes de désorption du plomb et du chrome sont parallèles. À titre informatif, on a inséré la courbe du pH du sol en fonction de la quantité d'ions H^+ ajoutés. Celle-ci décrit un comportement étrange car sur la base de la courbe tampon du sol 5, le pH du sol devrait diminuer, au-lieu d'augmenter en fonction de la quantité d'ions H^+ ajoutés.

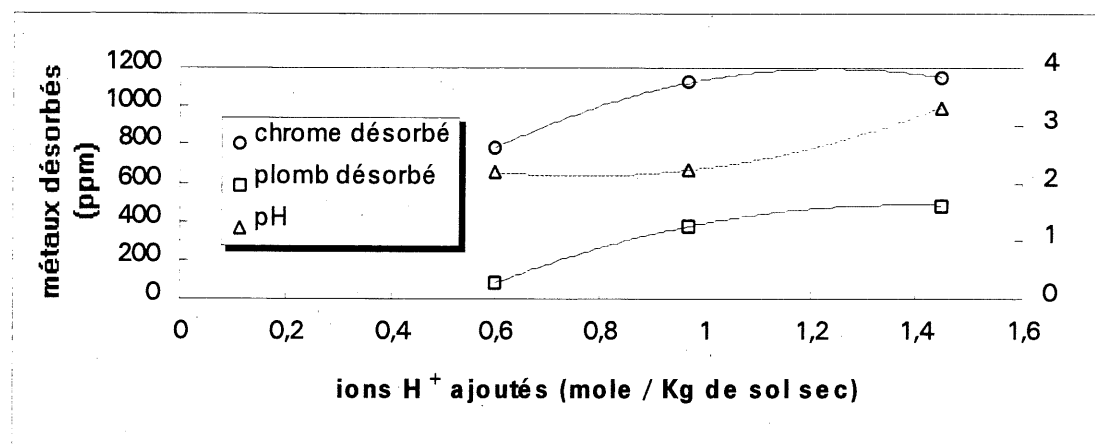


Figure 8.4 Postacidification du sol de l'essai CB11

L'ajout de 1,45 mole d'ions H^+ par kg de sol sec (HCl) a permis de solubiliser 1150ppm de chrome (test de postacidification CB11(c)). C'est donc dire que si la concentration en chrome sorbé avait été de 3121ppm avant la postacidification, elle aurait passé à 1971ppm après postacidification. Le test de postacidification CB9 a donc été le plus efficace puisqu'il a conduit la concentration en chrome sorbé de 3121ppm à 1368ppm, et ce avec l'ajout de seulement 0,87 mole d'ions H^+ par Kg de sol sec. À la lumière de ces résultats, on conclut que le tandem HCl et CH_3COOH serait plus efficace que l'acide chlorhydrique seul. La préacidification et le contrôle par un mélange HCl et CH_3COOH pourrait ainsi s'avérer une avenue intéressante. Aussi, s'il est vrai que la phase adsorbante est composée d'hydroxydes, l'utilisation d'une solution de $NH_2OH \cdot HCl$ diluée dans de l'acide acétique pourrait donner de bons résultats dans un contexte de prétraitement (voir section 2.3.5).

8.3 Conclusion

Comparativement aux trois autres sols testés, on a vu qu'il est très difficile de solubiliser les métaux lourds du sol 5 par électrocinétique. À la section 8.3.1, on résume les faits qui permettent d'établir si le comportement particulier du sol 5 est dû à la présence du chrome ou à la nature du sol. La section suivante présente les stratégies qui, selon l'auteur, pourraient être plus efficaces que celles adoptées jusqu'à maintenant. On a réservé la section 8.1.3 à l'aspect migration ionique parce qu'il a été très important au cours des essais effectués avec le sol 5.

8.3.1 Source du problème de sorption

Les quatre stratégies mises à l'essai pour décontaminer le sol 5 ont permis d'extraire le chrome et le plomb solubilisés par la préacidification, et même un peu plus. Cependant, aucune des quatre stratégies a mené la concentration résiduelle en chrome sous le seuil des 3000ppm, et ce même si le pH du sol a été maintenu sous une valeur de 2,52 en cours de traitement. Ainsi, il semble que l'acidification du sol en cours de traitement n'a pas permis de solubiliser suffisamment de chrome. Il s'ensuit que la préacidification serait indispensable au traitement du sol 5.

Une des stratégies a mené la concentration résiduelle en plomb sous le seuil des 500ppm mais, en général, les taux d'extraction du plomb étaient plus faibles que ceux du chrome. D'autre part, on a vu que suite à la préacidification à l'acide chlorhydrique, le chrome et le plomb ont migré vers l'anode sous forme de complexes négatifs. De ces derniers faits, on conclut que l'extraction du chrome n'a pas nécessairement été plus problématique que celle du plomb. D'ailleurs, des observations expérimentales, en particulier des tests de préacidification, ont montré que le comportement du sol 5 serait relié à la phase adsorbante. L'utilisation d'«hydroxylamine hydrochloride» ($\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$) pourrait permettre de conclure à la présence d'une phase «hydroxyde», et ainsi de faire le lien entre un problème de sorption et une phase particulière.

8.3.2 Essais proposés

Si le chrome et le plomb sont bel et bien liés au sol 5 par une phase «hydroxyde», l'utilisation de $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ pourrait s'avérer efficace dans un contexte de prétraitement. Aussi, quel que soit la nature des liens entre le sol 5 et les métaux lourds, il semble qu'une combinaison d'acide acétique et d'acide chlorhydrique serait efficace comme acide de contrôle et dans un contexte de préacidification. C'est ainsi qu'on propose la stratégie suivante:

- Traitement par voie acide: HCl et CH_3COOH à la cathode et préacidification avec HCl et CH_3COOH ou avec $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$.

Au cas où cette stratégie ne serait pas concluante, on propose une stratégie alternative:

- Suivre la procédure de l'essai CB9 jusqu'à l'évacuation des métaux lourds solubilisés par la préacidification, réacidifier le sol à l'acide chlorhydrique et procéder de nouveau comme en CB9.

8.3.3 Migration ionique

Au cours des chapitres 6 et 7, on a caractérisé l'avancée d'un front d'acétates par l'évolution de la résistivité et du pH du sol. En plus de ces deux facteurs, l'évolution de la couleur du sol et des concentrations en métaux lourds a permis de caractériser l'avancée d'un front d'acétates lors de deux essais effectués avec le sol 5. De la même façon, on a aussi caractérisé l'avancée d'un front d'ions Cl^- lors d'un essai contrôlé à l'acide chlorhydrique. Ces observations, faites au cours des essais CB9 à CB11, ont confirmé l'avancée en bloc des ions initialement présents dans le sol, et de ceux provenant des réservoirs, à condition que ces ions ne réagissent pas avec le sol. Aussi, on a validé l'hypothèse selon laquelle l'association d'ions H^+ et d'ions CH_3COO^- provoque l'augmentation de la résistivité du sol. En effet, contrairement à un front d'ions Cl^- , un front d'acétates a provoqué l'augmentation brusque de la résistivité d'un sol acide.

Conclusion

Les trois objectifs spécifiques de cette étude étaient de décrire l'effet du changement d'échelle, des carbonates et du chrome sur la décontamination des sols par électrocinétique. Un objectif plus général était de décrire la migration des métaux lourds au cours d'un traitement. Pour atteindre ces objectifs, douze essais de décontamination par électrocinétique ont été effectués en cellule de 1 litre, et un essai a été effectué en cellule de 100 litres. Deux sols de source industrielle et deux sols contaminés en laboratoire ont été testés. Ces sols étaient principalement contaminés par du zinc, du chrome, du plomb, du cuivre, ou une combinaison de ces métaux lourds.

Lors des conclusions partielles, des réponses aux questions posées par les trois objectifs spécifiques ont été données, en plus d'autres informations. Ici, on fera la synthèse des éléments reliés directement aux objectifs spécifiques. Ensuite, on présentera un résumé des éléments relatifs à l'objectif général, pour terminer avec la présentation des perspectives de recherches proposées par l'auteur.

Objectifs spécifiques

Effet du changement d'échelle

- Le nombre de charges par unité de volume qu'il faut appliquer pour traiter un sol donné semble indépendant des dimensions de la cellule de traitement. Cela a pour conséquence que l'énergie volumique nécessaire au traitement d'un sol donné est proportionnelle à la longueur de la masse de sol contaminé. Pour économiser temps et énergie, on aurait donc intérêt à restreindre la distance entre les électrodes lors de la conception d'une cellule à échelle industrielle ou d'un traitement *in-situ*.

Effet des carbonates

- Pour les sols à forte teneur en carbonates, il semble que la désorption et l'extraction des métaux lourds passe par la dissolution et l'évacuation des carbonates. Par conséquent, il est possible d'abaisser les concentrations en métaux lourds à des valeurs acceptées par le MEF. Cependant, la quantité d'énergie, la charge, et le temps nécessaires à la décontamination peuvent être considérables, et ils devraient dépendre de la teneur en carbonates.

Effet du chrome

- Face à l'électrocinétique, il semble que le chrome a un comportement semblable à celui du plomb, et possiblement à celui des autres métaux lourds. La difficulté d'extraire les métaux lourds du sol 5 serait reliée à une phase «hydroxyde».

Objectif général

Les résultats d'essais conduits avec le sol d'Ascot, le sol 4 et le sol 5 permettent d'établir la conclusion suivante:

- Les ions initialement présents dans un sol, et ceux provenant des réservoirs migrent en bloc sous l'influence d'un gradient électrique, à condition que ces ions ne réagissent pas avec le sol ou entre eux.

Aussi, les résultats d'essais conduits avec le sol d'Ascot et le sol 4 permettent d'établir une autre conclusion:

- Les concentrations (en équivalents par litre) des ions de remplacement dépendent de celles des ions remplacés.

De plus, on a démontré la possibilité que les concentrations des ions de remplacement soient identiques à celles des ions remplacés. Une conséquence de cette conclusion est que la

vitesse normalisée des fronts (et ainsi la vitesse de décontamination) diminue avec l'augmentation de la concentration initiale en ions solubles.

Ces deux conclusions pourraient être considérées comme point de départ au développement d'un modèle décrivant le traitement électrocinétique des sols en général. Pour établir un tel modèle, il faudrait tenir compte de l'évolution des gradients électriques et de l'interaction des ions entre eux et avec le sol. Un exemple de l'interaction des ions entre eux est l'association des ions H^+ et des acétates. Les résultats d'essais conduits avec les quatre sols testés ont démontré que:

- Le remplacement d'ions par des ions H^+ et des acétates engendre une augmentation prononcée de la résistivité, à condition que les ions H^+ et CH_3COO^- soient pratiquement exclusifs lorsqu'ils se rencontrent.

L'idée à la base de cette dernière conclusion a été tirée de BEAULIEU (1995).

Perspectives de recherches

Afin de faire le lien entre un problème de sorption et une phase particulière - comme dans le cas des carbonates - la caractérisation de la phase adsorbante du sol 5 devrait être faite. L'utilisation d'une procédure d'extraction séquentielle serait un moyen de procéder. Aucune stratégie n'a permis d'abaisser la concentration en chrome du sol 5 sous le critère C, mais on propose deux nouvelles stratégies qui pourraient être plus efficaces que celles mises à l'essai jusqu'à maintenant. On a proposé quatre stratégies qui permettraient d'améliorer l'efficacité du traitement des sols contenant beaucoup de carbonates.

Annexe A

ESSAI CB1 - sol d'Ascot

Du 25 au 28 mars 1994

Me eau

Me
sur sol

Me sol

Paramètres:

Courant: 125 mA

Réservoir anodique: CH₃COOH 0,87MRéservoir cathodique: circulation de CH₃COOH 0,87M

TABLEAU A.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	14,9	4,69	3101	15095	27
<i>sol cont. 2</i>	15,73	4,67	3432	15743	28
<i>sol cont. 3</i>	15,14	4,67	3202	16132	24
moyenne*	15,26	4,68	3245	15657	26

TABLEAU A.2 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

réservoir anodique	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir cathodique
	43	41	33	31	23	21	13	11	

zone	w%	pH sol	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
42	21,49	2,55	47	n.d.	n.d.
43	20,9	2,51	59	122	57
40	19,56	2,63	50	n.d.	n.d.
41	18,5	2,57	320	605	65
32	19,38	2,73	46	n.d.	n.d.
33	18,88	2,86	61	58	82
30	19,41	3,93	38	n.d.	n.d.
31	18,58	4	60	11	97
22	19,09	4,08	51	n.d.	n.d.
23	18,44	4,35	80	87	80
20	18,88	4,36	139	n.d.	n.d.
21	18,9	4,73	326	700	59
12	19,38	4,59	144	n.d.	n.d.
13	19,19	5,42	893	3524	24
10	19,85	5,01	431	n.d.	n.d.
11	20,19	5,88	1139	5107	9
moyenne*	19,41	3,89	243	1277	32

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB1

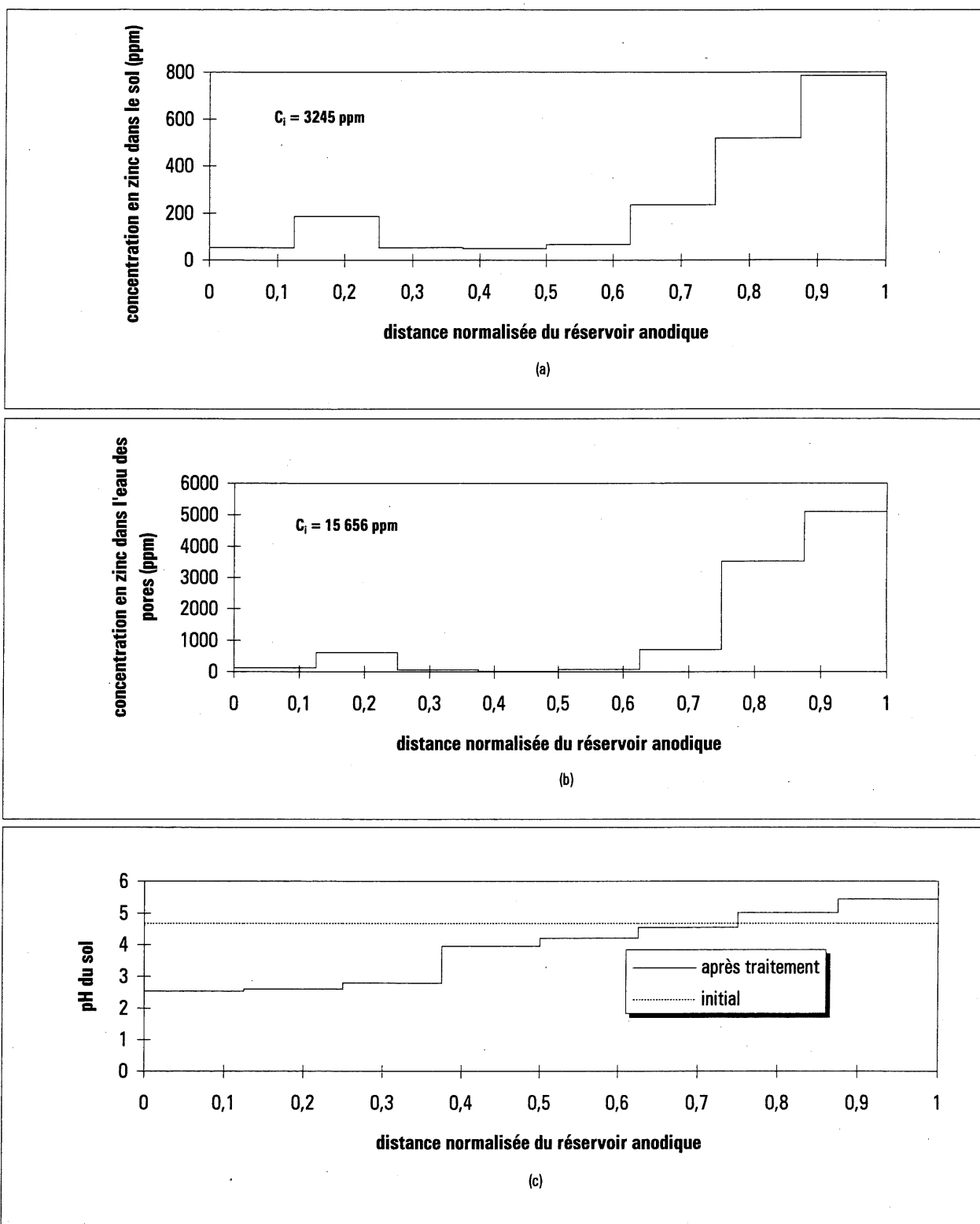


Figure A.1 Distribution du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB1

TABLEAU A.3 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	ano-rés (V)	rés-V1 (V)	V1-V2 (V)	V2-V3 (V)	V3-V4 (V)	V4-V5 (V)	V5-rés (V)	rés-cat (V)	ano-cat (V)
25-03-94	17h20	0	3,1	4,6	2,8	2,9	2,6	2,6	6,6	2,3	27,5
25-03-94	21h20	4	1,5	3,1	2,6	2	2,1	2,1	5	1,9	21,2
26-03-94	10h30	17,17	1,2	1,6	1,8	2,1	1,8	3,1	4,1	1,8	18,5
26-03-94	23h30	30,17	1,1	0,9	1,3	2,1	2,6	3,3	4,1	1,8	18
27-03-94	12h25	43,1	1	0,7	1,3	1,4	7,3	3,1	3,2	1,5	21,2
27-03-94	22h50	53,52	1	0,5	1	10,2	17,4	2,6	2,7	1,3	38,1
28-03-94	10h25	65,1	0,9	0,4	1	20,3	23,1	3,7	2,4	1	54,1
28-03-94	12h00	66,7	0,9	0,4	1	21,9	24,2	4	2,3	1	56,9

ESSAI CB1

TABLEAU A.4 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	ano-rés Ohmxcm	rés-V1 Ohmxcm	V1-V2 Ohmxcm	V2-V3 Ohmxcm	V3-V4 Ohmxcm	V4-V5 Ohmxcm	V5-rés Ohmxcm	rés-cat Ohmxcm	ano-cat Ohmxcm
25-03-94	17h20	0	125	1832	916	450	457	410	415	1299	1459	714
25-03-94	21h20	4	125	887	618	418	315	331	335	984	1205	550
26-03-94	10h30	17,17	125	709	319	290	331	284	494	807	1142	480
26-03-94	23h30	30,17	126,5	642	177	207	327	405	520	797	1128	462
27-03-94	12h25	43,1	125,3	590	139	209	220	1148	493	628	949	549
27-03-94	22h50	53,52	118,8	622	105	169	1692	2887	436	559	868	1041
28-03-94	10h25	65,1	120,5	552	83	167	3320	3778	612	490	658	1457
28-03-94	12h00	66,7	123,7	538	81	163	3489	3856	644	457	641	1493

ESSAI CB1

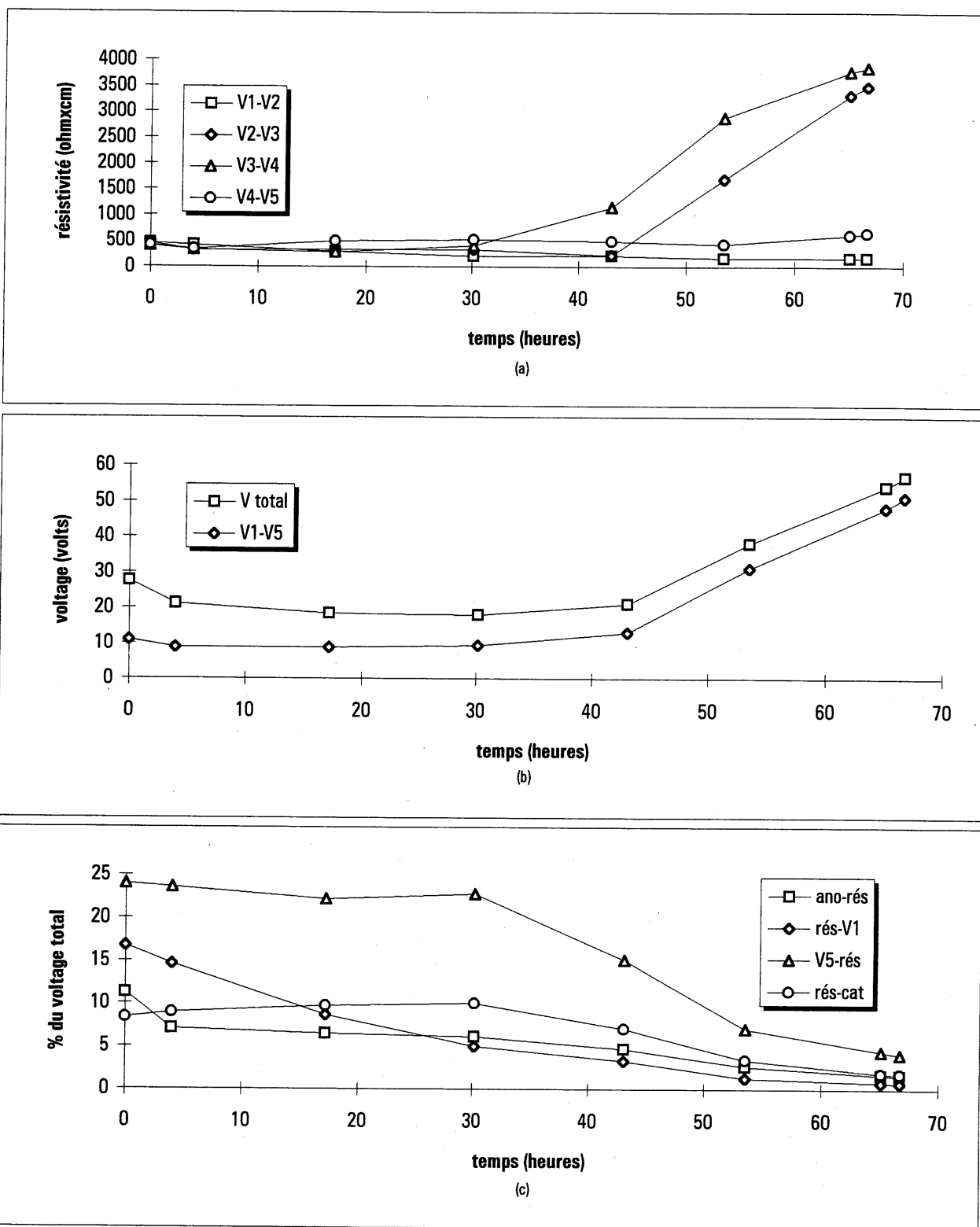


Figure A.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB1**section:** 70,4cm²**longueur:** 16,5cm

TABLEAU A.5 AUTRES RÉSULTATS

						CATHODE
temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	pH
0	1,67	0	0	0	0	
4	1,28	1800	12	18	18	3,23
17,17	1,12	7727	45	26	44	3,4
30,17	1,09	13612	75	14	58	3,51
43,1	1,28	19437	106	16	74	3,55
53,52	2,31	24010	144	6	80	3,74
65,1	3,28	29127	210	0	80	3,93
66,7	3,45	29843	221	0	80	4,08

ESSAI CB1

TABLEAU A.6 BILAN DE MASSE

item	dilution	A.A.	volume	ug zinc	% pr total
10	-	-	-	56614	0,83
11	-	-	-	149435	2,19
12	-	-	-	18846	0,28
13	-	-	-	117232	1,72
20	-	-	-	18204	0,27
21	-	-	-	42748	0,63
22	-	-	-	6724	0,10
23	-	-	-	10460	0,15
30	-	-	-	4949	0,07
31	-	-	-	7938	0,12
32	-	-	-	6043	0,09
33	-	-	-	8068	0,12
40	-	-	-	6595	0,10
41	-	-	-	42028	0,62
42	-	-	-	6145	0,09
43	-	-	-	7790	0,11
cathode	6250	87	100	444318	6,52
anode	10	106	100	853	0,01
pp cathode	25	150	100	3051	0,04
pp anode	1	145	100	107	0,00
pf cathode	50	212	100	8648	0,13
pf anode	10	88	100	705	0,01
jus cathode	6250	138	100	704788	10,35
jus anode	25	243	100	4951	0,07
Total en gramme				1,68	24,63

Masse de zinc dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 6,81g

Masse de zinc dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 6,3g

NOTE: Il a été impossible de mesurer la quantité de zinc en solution à la cathode

ESSAI CB1

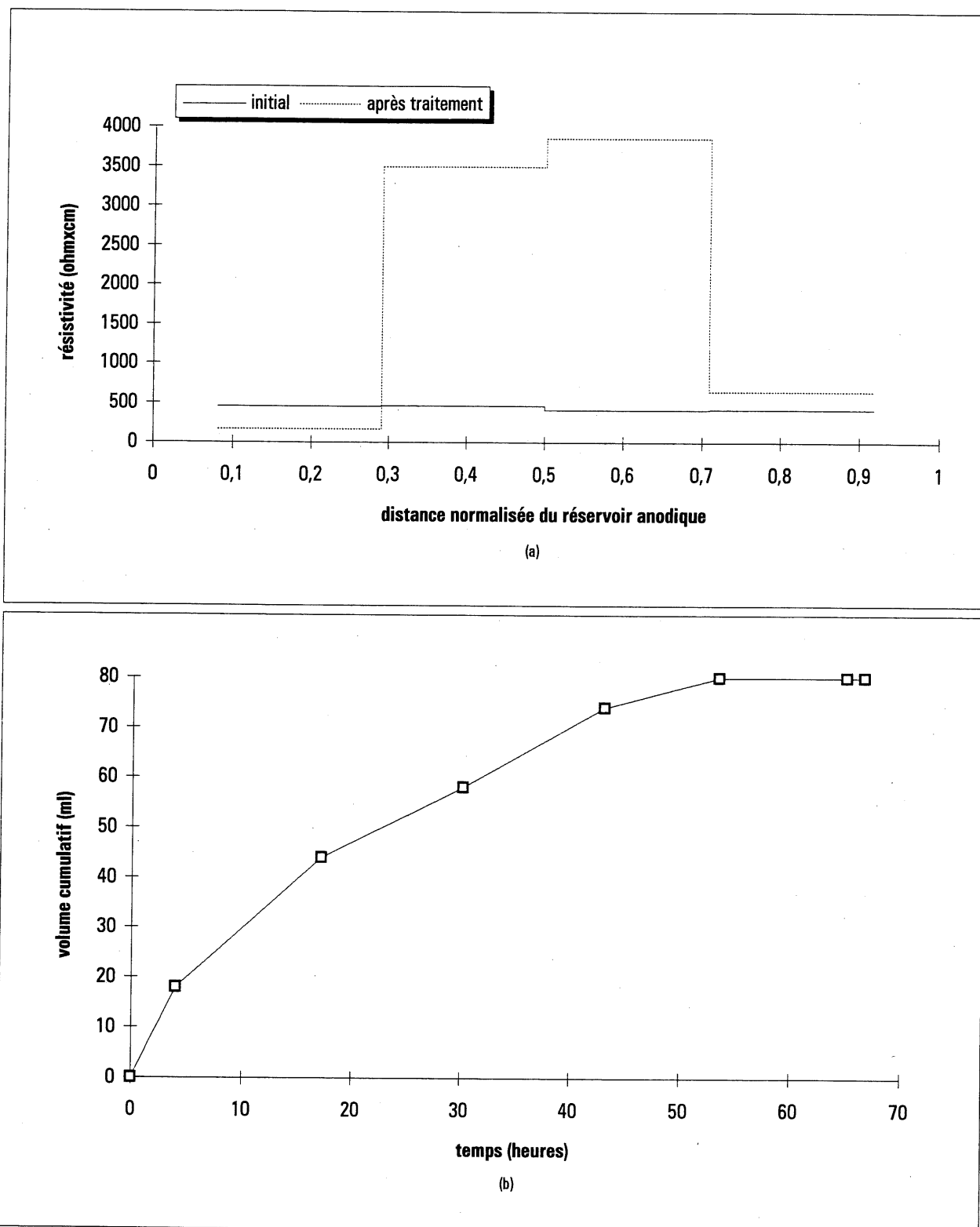


Figure A.3 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du débit électro-osmotique de l'anode vers la cathode (b).

Annexe B

ESSAI CB2 - sol d'Ascot

Du 05 au 08 juin 1994

Paramètres:

Courant: 125 mA

Réservoir anodique: CH₃COOH 0,87MRéservoir cathodique: recirculation du catholyte (CH₃COOH 0,87M au départ)

Me eau

Me
sur sol

Me sol

TABLEAU B.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	16,33	4,72	3216	10286	48
<i>sol cont. 2</i>	16,86	4,7	2910	10022	42
<i>sol cont. 3</i>	16,77	4,68	3270	11253	42
moyenne*	16,65	4,70	3132	10520	44

TABLEAU B.2 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

réservoir anodique	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir cathodique
	43	41	33	31	23	21	13	11	

zone	w%	pH sol	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
42	16,69	2,34	68	n.d.	n.d.
43	16,89	2,41	77	538	-17
40	16,28	2,35	144	n.d.	n.d.
41	15,35	2,24	74	552	-14
32	16,16	3,48	31	n.d.	n.d.
33	15,18	3,58	45	19	93
30	15,19	3,73	30	n.d.	n.d.
31	14,46	3,56	49	43	87
22	15,09	3,82	60	n.d.	n.d.
23	14,37	3,91	76	37	93
20	14,76	4,23	119	n.d.	n.d.
21	13,87	4,46	253	448	75
12	14,44	4,59	258	n.d.	n.d.
13	13,59	4,8	460	1499	56
10	14,74	5,05	920	n.d.	n.d.
11	14,42	5,46	1060	4360	41
moyenne*	15,09	3,75	233	937	48

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB2

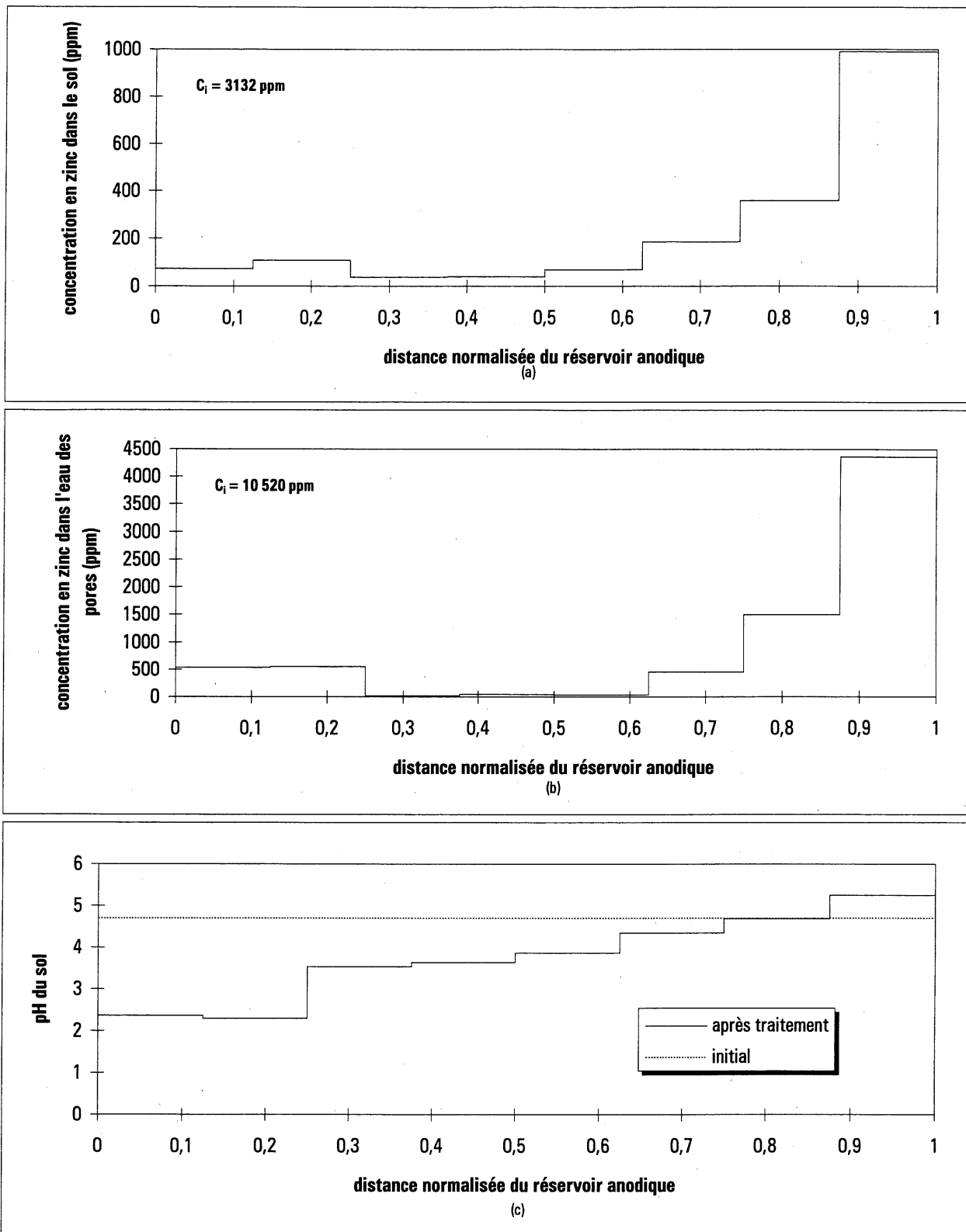


Figure B.1 Distribution du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB2

TABLEAU B.3 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
05-06-94	17h10	0	1,45	3,14	3,24	2,72	3,19	3	3,24	1,85	22,2
05-06-94	17h20	0,17	1,43	2,83	3,21	2,7	3,16	2,92	3,34	1,97	21,78
05-06-94	17h35	0,42	1,35	2,58	3,14	2,73	3,12	2,85	3,52	2,01	21,56
05-06-94	17h45	0,58	1,32	2,43	3,01	2,71	2,99	2,88	3,75	1,96	21,29
05-06-94	18h00	0,83	1,28	2,24	3,07	2,67	3,06	2,67	3,65	1,91	20,79
05-06-94	18h15	1,08	1,24	2,07	3	2,64	3	2,7	3,49	1,85	20,21
05-06-94	19h15	2,08	1,18	1,75	2,9	2,5	2,94	2,65	3,61	1,85	19,57
05-06-94	20h15	3,08	1,13	1,4	2,92	2,41	2,72	2,58	3,31	1,92	18,78
05-06-94	23h35	6,42	1,08	1,01	2,87	2,44	2,75	2,54	4,04	1,96	18,79
06-06-94	9h10	16	1,01	0,74	2,21	2,48	2,69	3,34	3,78	1,72	18,06
06-06-94	11h20	18,17	1,01	0,71	1,99	2,54	2,67	3,55	3,45	1,69	17,8
06-06-94	11h55	18,75	1,01	0,7	1,9	2,61	2,7	3,46	3,58	1,69	17,92
06-06-94	13h40	20,5	1,04	0,64	1,8	2,8	2,68	4	3,45	1,69	18,44
06-06-94	23h30	30,33	1,02	0,52	1,47	2,78	3,45	4,4	3,49	1,57	18,8
07-06-94	9h25	40,25	1	0,4	1,33	2,33	6	4,3	3,24	1,5	20,37
07-06-94	11h20	42,17	1	0,41	1,34	3,96	8,41	4,38	3,41	1,5	24,58
07-06-94	13h40	44,5	0,99	0,38	1,3	6,91	10,37	4,2	3,49	1,46	29,41
07-06-94	16h35	47,42	0,98	0,35	1,23	11,03	13	4,03	3,56	1,39	35,7
07-06-94	20h15	51,08	0,96	0,36	1,22	18,36	16,79	3,81	3,49	1,47	46,8
07-06-94	22h00	52,83	0,95	0,36	1,19	21,59	17,81	3,74	3,51	1,46	51,1
08-06-94	8h20	63,17	0,9	0,29	2,83	28,21	21,55	4,1	3,31	1,38	62,9
08-06-94	9h50	64,67	0,9	0,28	3,56	27,6	21,43	4,09	3,24	1,36	62,9
08-06-94	11h35	66,42	0,89	0,28	4,3	27,07	21,36	4,19	3,11	1,34	62,9
08-06-94	13h30	68,33	0,83	0,28	5	26,57	21,17	4,24	3,03	1,29	62,9

ESSAI CB2

TABLEAU B.4 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
05-06-94	17h10	0	125	857	625	521	429	503	478	638	1173	576
05-06-94	17h20	0,17	125,2	844	563	516	425	497	465	656	1248	565
05-06-94	17h35	0,42	125,1	797	514	505	430	492	454	692	1274	559
05-06-94	17h45	0,58	125,9	775	481	481	424	468	456	733	1234	549
05-06-94	18h00	0,83	125,9	751	443	490	418	479	423	713	1203	536
05-06-94	18h15	1,08	126	727	409	479	413	469	427	681	1164	520
05-06-94	19h15	2,08	126	692	346	463	391	460	419	705	1164	504
05-06-94	20h15	3,08	127	657	274	462	374	422	405	641	1199	480
05-06-94	23h35	6,42	124,8	639	202	462	385	434	406	796	1245	489
06-06-94	9h10	16	125,4	595	147	354	390	423	531	742	1088	467
06-06-94	11h20	18,17	125,7	594	141	318	398	419	563	675	1066	460
06-06-94	11h55	18,75	125,4	595	139	305	410	424	550	702	1069	464
06-06-94	13h40	20,5	125,4	613	127	289	440	421	636	677	1069	477
06-06-94	23h30	30,33	130	580	100	227	421	523	675	660	958	469
07-06-94	9h25	40,25	122,7	602	81	218	374	964	698	650	969	539
07-06-94	11h20	42,17	123	601	83	219	635	1348	710	682	967	648
07-06-94	13h40	44,5	124,6	587	76	210	1093	1640	672	689	929	766
07-06-94	16h35	47,42	123	589	71	201	1767	2083	653	712	896	942
07-06-94	20h15	51,08	121	586	74	203	2991	2735	628	710	963	1255
07-06-94	22h00	52,83	124	566	72	193	3432	2831	601	696	934	1337
08-06-94	8h20	63,17	115,6	575	62	492	4810	3674	707	704	947	1766
08-06-94	9h50	64,67	112,8	589	62	635	4823	3745	723	707	956	1809
08-06-94	11h35	66,42	110,5	595	63	783	4829	3810	756	692	962	1847
08-06-94	13h30	68,33	107,6	570	65	934	4867	3878	785	693	951	1897

ESSAI CB2

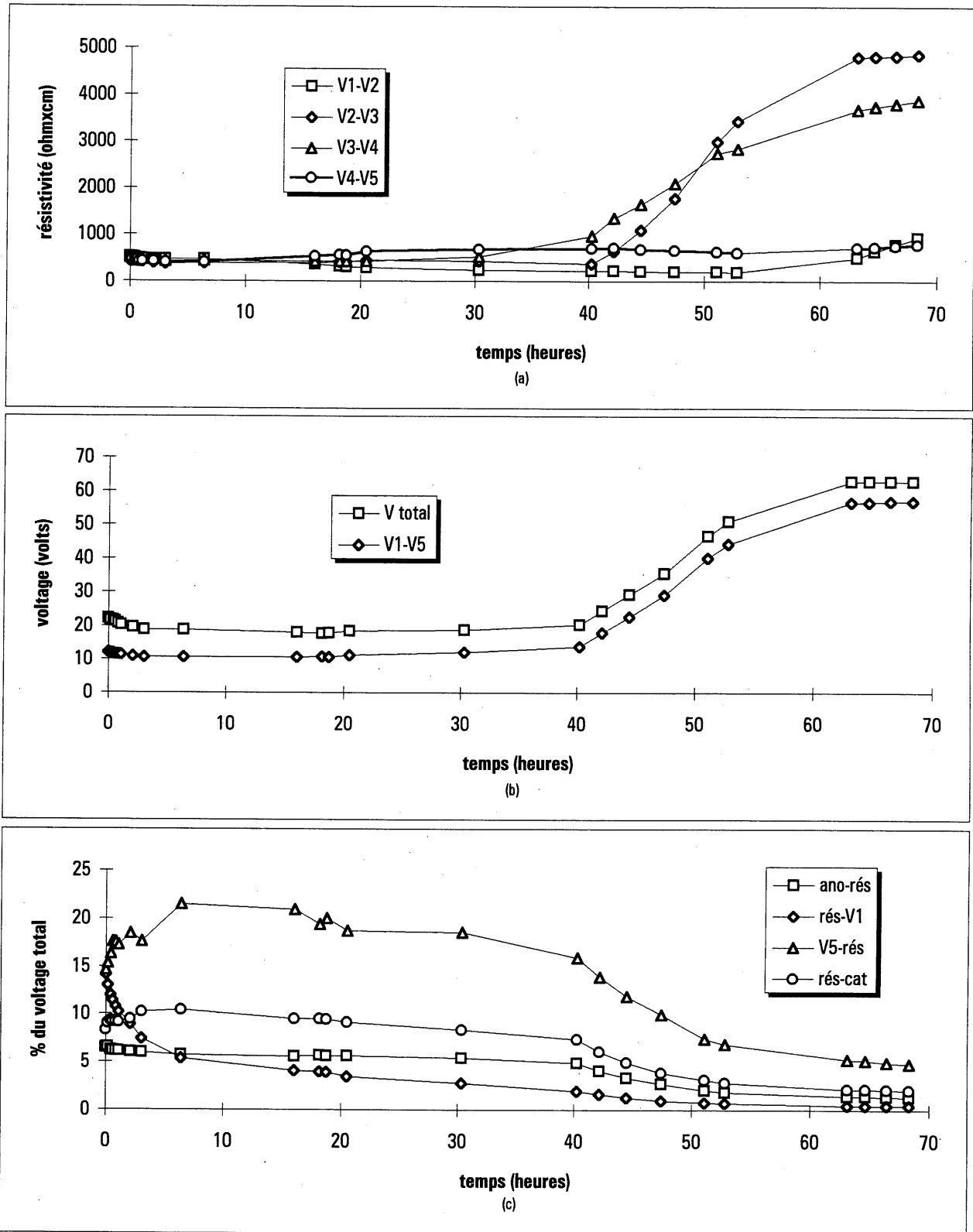


Figure B.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB2

section: 71,4cm²

longueur: 16,5cm

TABLEAU B.5 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE		pH bécher cathode
						pH	conductivité (umho)	
0	1,35	0	0	0	0			
0,17	1,32	77	0	0	0			
0,42	1,31	189	1	0	0			
0,58	1,29	261	2	0	0			
0,83	1,26	374	2	0	0			
1,08	1,22	487	3	0	0			
2,08	1,19	939	5	0	0	3,03	1600	2,51 ≥ 2,20
3,08	1,14	1393	8	0	0			
6,42	1,14	2894	16	0	0	3,25	1900	
16	1,09	7212	38	12	12	2,93	2250	2,57
18,17	1,08	8192	43	4	16			
18,75	1,09	8453	44	0	16			
20,5	1,12	9242	48	6	22	2,83	2500	2,66
30,33	1,14	13754	71	18	40	2,96	3000	2,86
40,25	1,23	18177	95	8	48	3	3200	2,90 ≥ 2,66
42,17	1,49	19034	101	2	50			
44,5	1,78	20081	108	2	52	3,04	3600	2,72
47,42	2,16	21384	120	1	53			
51,08	2,84	23005	139	0	53	2,94	3400	2,82 ≥ 2,70
52,83	3,10	23789	150	0	53			
63,17	3,81	28267	220	0	53			
64,67	3,81	28884	231	-8	-8	2,93	3800	2,88
66,42	3,81	29587	243	0	-8			
68,33	3,81	30337	257	-1	-9		4750	

ESSAI CB2

TABLEAU B.6 BILAN DE MASSE

item	dilution	A.A.	volume	ug zinc	% pr total
10	-	-	-	120793	1,84
11	-	-	-	139159	2,11
12	-	-	-	33912	0,52
13	-	-	-	60402	0,92
20	-	-	-	15577	0,24
21	-	-	-	33259	0,51
22	-	-	-	7940	0,12
23	-	-	-	9944	0,15
30	-	-	-	3960	0,06
31	-	-	-	6432	0,10
32	-	-	-	4075	0,06
33	-	-	-	5869	0,09
40	-	-	-	18876	0,29
41	-	-	-	9760	0,15
42	-	-	-	8883	0,13
43	-	-	-	10160	0,15
bouteille1	625	209	30	27449	0,42
bouteille2	625	225	22	21671	0,33
bouteille3	2500	82	18	25847	0,39
bouteille4	2500	129	17	39078	0,59
bouteille5	2500	136	18	43622	0,66
bouteille6	2500	135	17	40896	0,62
bouteille7	2500	156	14	38918	0,59
bouteille8	2500	167	22	65469	0,99
bouteille9	2500	192	20	68427	1,04
bouteille10	2500	240	20	85534	1,30
cathode	15625	154	100	1812295	27,54
anode	50	144	100	5409	0,08
pp cathode	25	146	100	2736	0,04
pp anode	2	173	100	247	0,00
pf cathode	250	118	50	11096	0,17
pf anode	25	168	50	1568	0,02
catholyte	15625	107	250	3147990	47,84
anolyte	625	77	250	90602	1,38
Total en gramme				6,02	91,46

Masse de zinc dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 6,58g

Masse de zinc dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 6,3g

ESSAI CB2

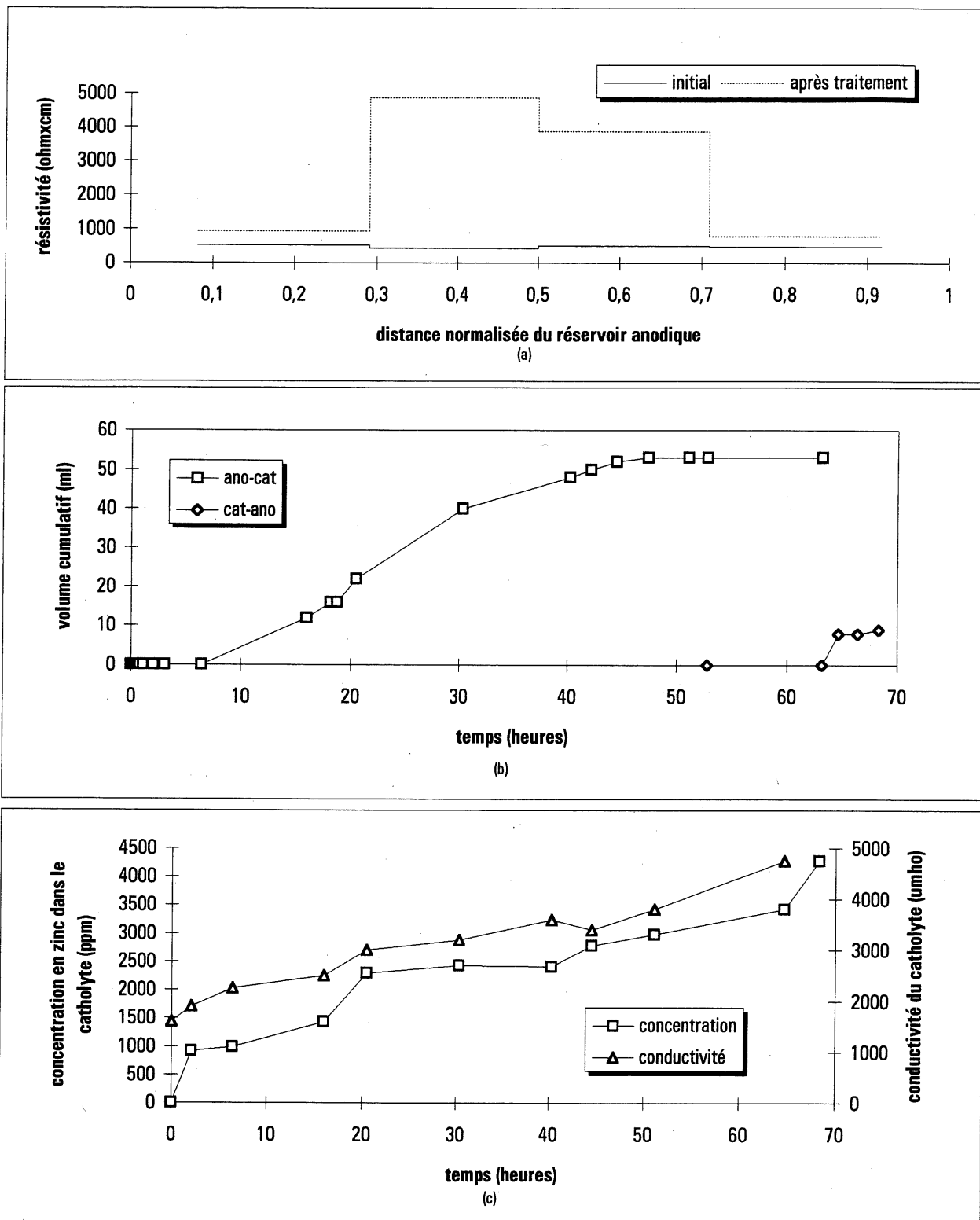


Figure B.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique(b), de la conductivité et de la concentration en zinc dans le catholyte (c).

Annexe C

ESSAI CB3 - sol d'Ascot

Du 27 au 30 juin 1994

Me eau

Me
sur sol

Me sol

Paramètres:

Courant: 125 mA

Réservoir anodique: CH₃COOH 0,87MRéservoir cathodique: recirculation du catholyte (CH₃COOH 0,87M au départ)

TABLEAU C.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	15	4,43	3161	13552	36
<i>sol cont. 2</i>	14,98	4,42	2842	13193	30
<i>sol cont. 3</i>	15,62	4,42	2826	13134	27
moyenne*	15,20	4,42	2943	13293	31

TABLEAU C.2 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

réservoir anodique	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir cathodique
	43	41	33	31	23	21	13	11	

zone	w%	pH sol	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
42	18,04	2,44	108	n.d.	n.d.
43	16,45	2,39	127	755	2
40	16,69	2,35	86	n.d.	n.d.
41	15,24	2,33	133	740	15
32	16,08	3,59	28	n.d.	n.d.
33	14,86	3,88	33	24	89
30	15,44	3,94	50	n.d.	n.d.
31	15,54	3,95	47	19	94
22	15,34	3,97	38	n.d.	n.d.
23	14,32	3,94	39	25	91
20	15,95	4,34	172	n.d.	n.d.
21	14,87	4,32	151	364	64
12	15,49	4,73	520	n.d.	n.d.
13	14,22	4,74	498	1442	59
10	16,26	5,31	823	n.d.	n.d.
11	15,54	5,48	1040	4489	33
moyenne*	15,65	3,86	243	982	42

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB3

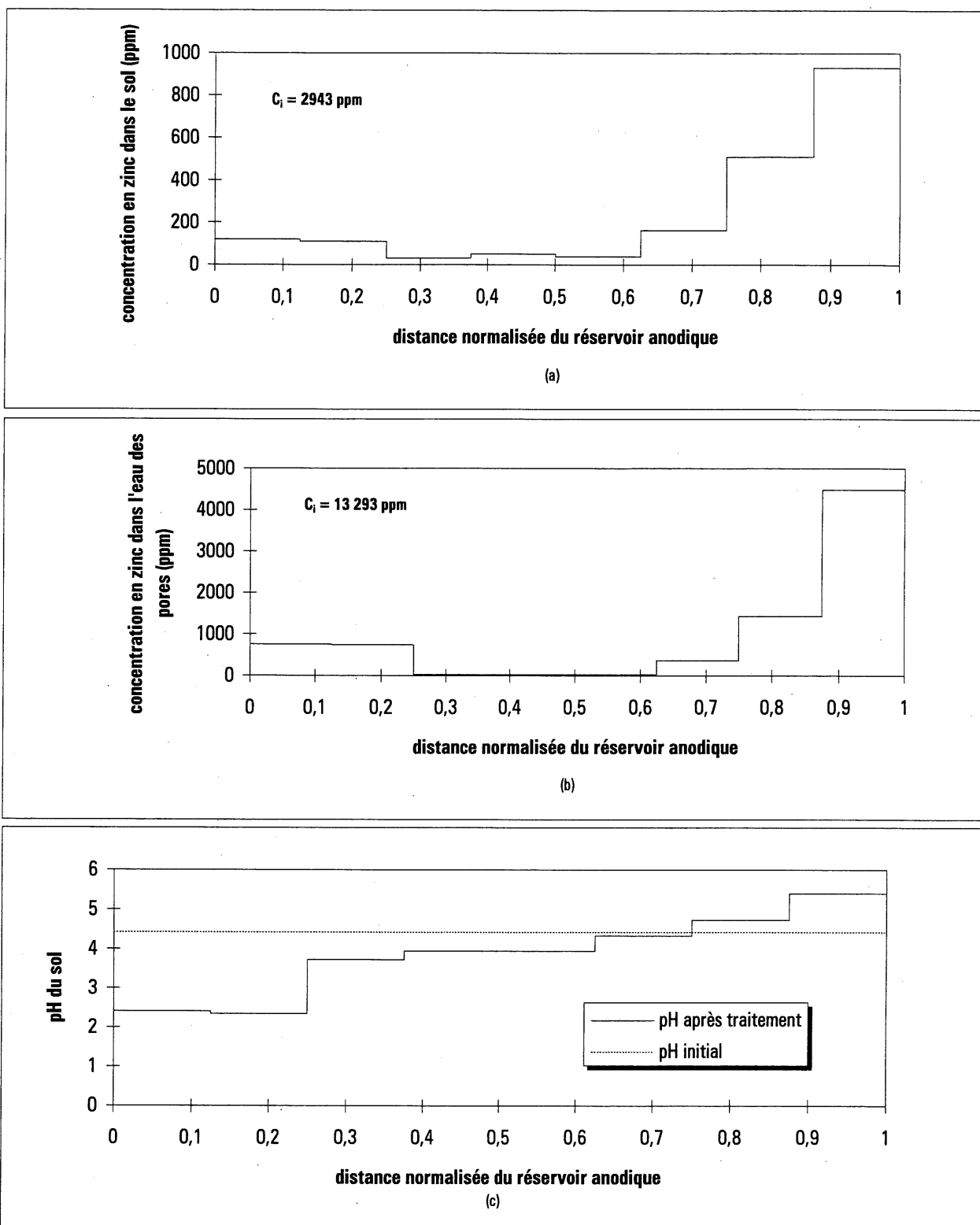


Figure C.1 Distribution du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB3

TABLEAU C.3 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
27-06-94	9h30	0,25	3,04	3,01	2,83	2,7	3,15	2,7	4,11	6,81	28,54
27-06-94	10h00	0,75	2,42	2,4	2,85	2,58	3,07	2,7	3,6	5,91	26,02
27-06-94	10h15	1	2,19	2,18	2,91	2,63	3,05	2,79	3,59	5,83	25,27
27-06-94	11h30	2,25	1,79	1,72	2,72	2,57	3,02	2,65	3,05	4,71	22,34
27-06-94	12h00	2,75	1,69	1,55	2,84	2,54	2,95	2,62	2,98	4,44	21,64
27-06-94	13h00	3,75	1,57	1,48	3,31	2,01	2,86	2,29	3,11	4,23	21,03
27-06-94	14h30	5,25	1,46	0,96	2,89	2,31	2,66	2,31	2,77	3,78	19,44
27-06-94	17h30	8,25	1,34	0,93	2,55	2,34	2,62	2,39	2,82	3,39	18,57
27-06-94	20h00	10,75	1,3	0,88	2,41	2,34	2,58	2,45	2,86	3,17	18,25
27-06-94	22h30	13,25	1,26	0,84	2,26	2,36	2,57	2,82	2,75	3	18,09
28-06-94	9h45	24,5	1,17	0,6	1,69	2,53	2,59	3,79	2,72	2,73	18,11
28-06-94	14h00	28,75	1,15	0,54	1,57	2,58	2,93	3,97	2,77	2,58	18,36
28-06-94	16h30	31,25	1,07	0,5	1,48	2,54	3,1	3,87	2,64	2,57	18,1
29-06-94	1h30	40,25	1,12	0,4	1,47	2,32	4,11	4,08	2,64	2,5	18,63
29-06-94	12h15	51	1,15	0,53	1,25	9,3	14,65	3,23	2,53	2,19	36,6
29-06-94	14h30	53,25	1,07	0,33	1,22	15,58	17,2	3,59	2,28	2,21	44,4
29-06-94	18h15	57	1,18	0,67	1,09	21,84	17,07	3,33	2,23	2,05	52,1
29-06-94	23h15	62	1,02	0,73	1,12	28,55	22,84	3,9	2,68	1,98	63,3
30-06-94	6h45	69,5	0,98	0,33	3,72	26,86	22,39	4,52	2,25	1,76	63,3

ESSAI CB3

TABLEAU C.4 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
27-06-94	9h30	0,25	125,3	1792	598	454	425	496	429	807	4309	739
27-06-94	10h00	0,75	125	1430	478	459	407	484	430	708	3749	675
27-06-94	10h15	1	125	1294	434	468	415	481	445	707	3698	656
27-06-94	11h30	2,25	125	1058	343	438	405	476	423	600	2988	580
27-06-94	12h00	2,75	125	999	309	457	401	465	418	586	2816	562
27-06-94	13h00	3,75	131	885	281	508	302	430	348	584	2560	521
27-06-94	14h30	5,25	124,1	869	193	468	367	422	371	549	2415	508
27-06-94	17h30	8,25	125	792	185	410	369	413	381	555	2150	482
27-06-94	20h00	10,75	125	768	175	388	369	407	391	563	2011	474
27-06-94	22h30	13,25	124,7	747	168	364	373	406	451	543	1908	471
28-06-94	9h45	24,5	125,6	688	119	271	397	406	601	533	1723	468
28-06-94	14h00	28,75	126,6	671	106	249	402	456	625	538	1616	471
28-06-94	16h30	31,25	124,8	633	100	238	401	490	618	520	1633	471
29-06-94	1h30	40,25	124,6	664	80	237	367	650	653	521	1591	485
29-06-94	12h15	51	118,6	716	111	212	1546	2435	543	525	1464	1001
29-06-94	14h30	53,25	122,1	647	67	201	2515	2777	586	459	1435	1180
29-06-94	18h15	57	121,1	720	138	181	3555	2778	548	453	1342	1396
29-06-94	23h15	62	121,2	622	150	186	4643	3714	641	544	1295	1695
30-06-94	6h45	69,5	114,7	631	72	652	4616	3847	785	483	1217	1791

ESSAI CB3

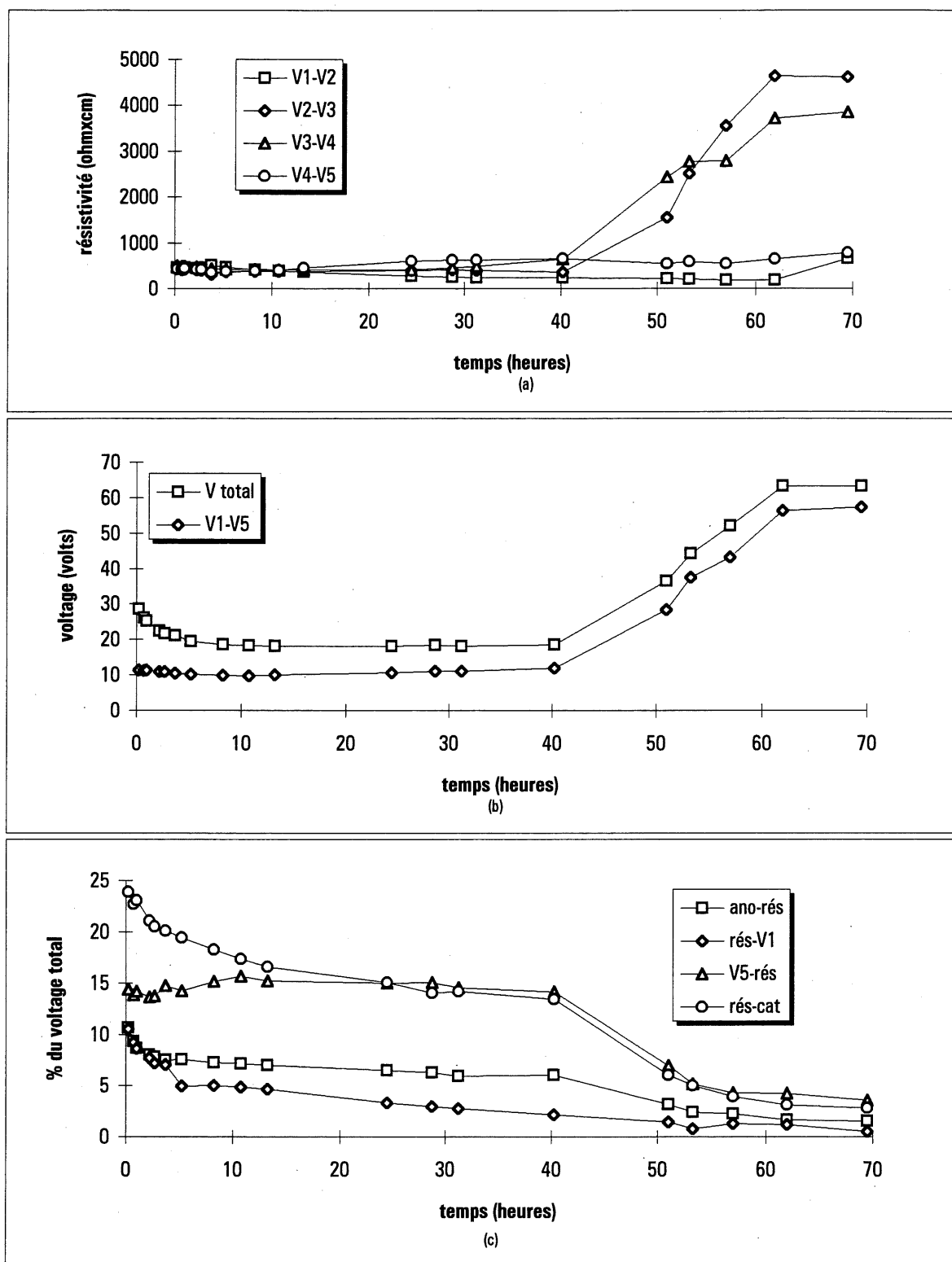


Figure C.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB3

section: 71,9cm²
longueur: 16,5cm

TABLEAU C.5 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE	pH bêcher cathode
						pH	
0,25	1,73	113	1	0	0		
0,75	1,58	338	3	0	0		
1	1,53	450	3	0	0		
2,25	1,35	1013	7	0	0		
2,75	1,31	1238	8	0	0		
3,75	1,27	1698	11	0	0		
5,25	1,18	2371	15	0	0		
8,25	1,13	3721	22	0	0	3,13	2,61
10,75	1,11	4846	28	0	0		
13,25	1,10	5970	34	0	0	3,41	2,82 ≥ 2,21
24,5	1,10	11044	59	4	4	3,13	2,66
28,75	1,11	12969	69	0	4	3,03	2,76
31,25	1,10	14093	75	0	4	3,07	2,83
40,25	1,13	18137	95	0	4	3,13	2,95 ≥ 2,80
51	2,22	22850	131	2	6		
53,25	2,69	23851	143	4	10	3,19	2,95
57	3,16	25512	165	0	10		
62	3,84	27728	200	0	10	3,23	3,02
69,5	3,84	30913	256	0	10	3,39	

ESSAI CB3

TABLEAU C.6 BILAN DE MASSE

item	dilution	A.A.	volume	ug zinc	% pr total
10	-	-	-	108054	1,75
11	-	-	-	136451	2,21
12	-	-	-	68286	1,10
13	-	-	-	65379	1,06
20	-	-	-	22513	0,36
21	-	-	-	19797	0,32
22	-	-	-	5024	0,08
23	-	-	-	5117	0,08
30	-	-	-	6609	0,11
31	-	-	-	6181	0,10
32	-	-	-	3730	0,06
33	-	-	-	4348	0,07
40	-	-	-	11332	0,18
41	-	-	-	17446	0,28
42	-	-	-	14167	0,23
43	-	-	-	16699	0,27
bouteille1	625	170	20	16238	0,26
bouteille2	625	198	20	18912	0,31
bouteille3	1250	142	20	27127	0,44
bouteille4	1250	216	14	30781	0,50
bouteille5	3125	100	21	53439	0,86
bouteille6	3125	107	24	65348	1,06
bouteille7	3125	113	20	57510	0,93
bouteille8	3125	128	20	65144	1,05
bouteille9	6250	102	20	103824	1,68
cathode	6250	117	500	2793870	45,21
anode	25	119	100	2285	0,04
pp cathode	25	86	100	1648	0,03
pp anode	1	244	100	185	0,00
géo cathode	25	207	100	3986	0,06
géo anode	25	181	100	3483	0,06
catholyte	15625	154	100	1859736	30,09
anolyte	625	228	100	110122	1,78
Total en gramme				5,72	92,63

Masse de zinc dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 6,18

Masse de zinc dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 6,3

ESSAI CB3

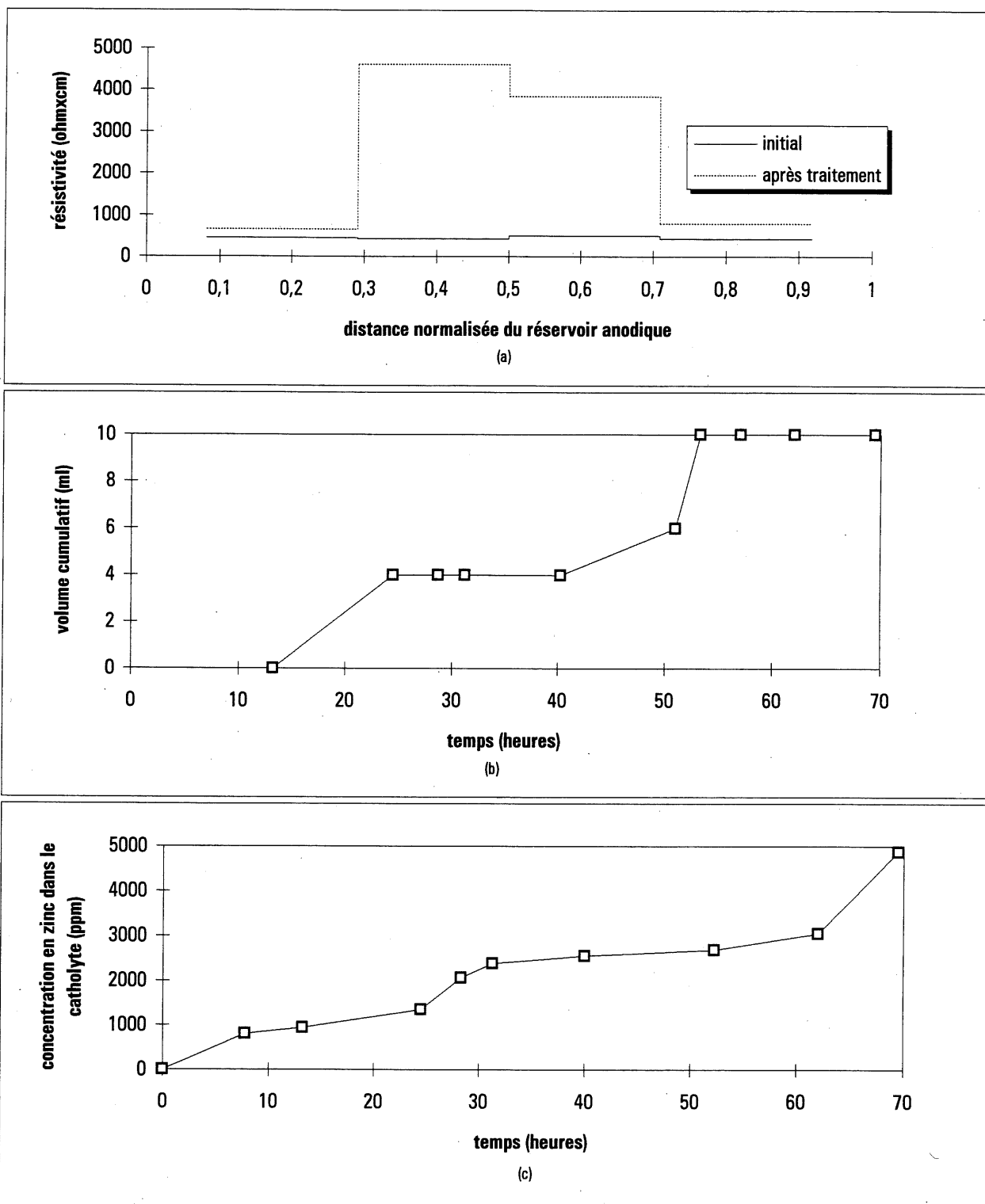


Figure C.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique de l'anode vers la cathode(b) et de la concentration en zinc dans le catholyte (c).

Annexe D

ESSAI CB4 - sol d'Ascot

Du 16 au 20 août 1994

Me eau

Me
sur sol

Me sol

Paramètres:

Courant: 125 mA

Réservoir anodique: CH₃COOH 0,87M

Réservoir cathodique: recirculation du catholyte (Q=260ml/h et CH₃COOH 0,87M au départ)

TABLEAU D.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	15,64	4,54	3088	12344	37
<i>sol cont. 2</i>	15,52	4,54	2970	12102	37
<i>sol cont. 3</i>	15,32	4,52	3151	13191	36
moyenne*	15,49	4,53	3070	12546	37

TABLEAU D.2 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

réservoir anodique	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir cathodique
	43	41	33	31	23	21	13	11	

zone	w%	pH sol	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
42	19,78	2,34	43	n.d.	n.d.
43	16,47	2,28	29	89	50
40	17,79	2,31	25	n.d.	n.d.
41	16,08	2,4	29	58	68
32	16,8	3,79	27	n.d.	n.d.
33	15,39	3,86	8	5	91
30	16,76	3,85	25	n.d.	n.d.
31	15,11	3,9	28	5	97
22	16,15	3,85	75	n.d.	n.d.
23	14,93	4,02	32	38	82
20	16,34	4,09	35	n.d.	n.d.
21	14,45	4,37	136	287	70
12	16,42	4,27	49	n.d.	n.d.
13	14,66	4,49	239	436	73
10	17,18	4,54	66	n.d.	n.d.
11	15,78	4,55	303	934	51
moyenne*	16,26	3,68	72	231	65

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB4

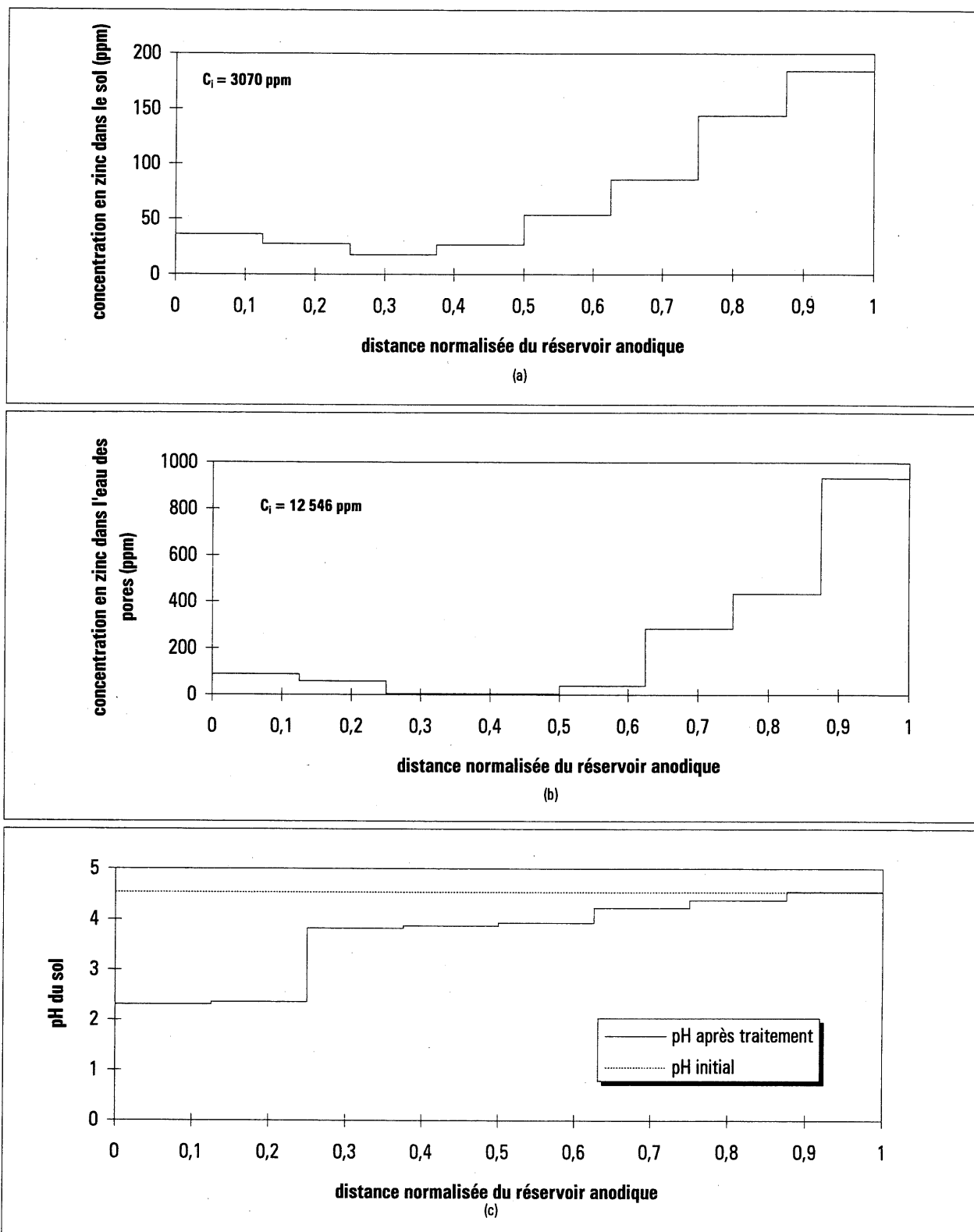


Figure D.1 Distribution du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB4

TABEAU D.3 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
16-08-94	21h45	0,5	3,34	2,01	2,97	2,68	2,95	2,84	3,9	5,81	26,58
16-08-94	22h15	1	2,78	1,71	2,95	2,66	2,91	2,82	3,85	5,39	25,16
16-08-94	23h15	2	2,25	1,38	2,82	2,53	2,79	2,72	3,67	4,58	22,81
17-08-94	9h15	12	1,26	0,96	2,3	2,27	2,63	3,23	3,56	2,71	18,98
17-08-94	12h15	15	1,19	0,88	2,08	2,25	2,59	3,6	3,66	2,56	18,84
17-08-94	17h15	20	1,16	0,8	1,88	2,23	2,55	3,96	3,41	2,31	18,34
17-08-94	22h45	25,5	1,08	0,7	1,77	2,16	2,57	4,5	3,11	2,22	18,23
18-08-94	13h00	39,75	1,12	0,49	1,48	1,89	3,7	4,49	3,01	1,75	18
18-08-94	14h45	41,5	1,07	0,52	1,47	1,91	4,3	4,45	3,06	2,37	19,27
18-08-94	17h15	44	1,04	0,49	1,45	1,73	7,18	4,45	2,77	2,12	21,4
18-08-94	22h15	49	1	0,45	1,4	3,95	15,8	4,12	2,72	1,88	31,58
19-08-94	00h30	51,25	0,99	0,44	1,37	7,19	18,15	4,08	2,92	2,38	37,6
19-08-94	1h15	52	0,99	0,43	1,38	8,95	19,47	4,1	3,31	1,94	40,8
19-08-94	11h15	62	0,91	0,36	1,01	24,8	25,08	4,14	2,51	1,99	61,1
19-08-94	14h30	65,25	0,87	0,35	1,23	25,5	25,2	4,34	2,33	1,97	62,1
19-08-94	16h45	67,5	0,88	0,34	1,98	24,99	25	4,49	2,27	1,95	62,1
19-08-94	23h45	74,5	0,89	0,3	4,11	23,99	23,61	4,92	2,42	1,69	62,1
20-08-94	9h45	84,5	0,89	0,27	6,61	23,42	21,55	5,22	2,25	1,68	62,2

ESSAI CB4

TABLEAU D.4 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
16-08-94	21h45	0,5	125,4	1968	399	476	421	464	451	765	3674	688
16-08-94	22h15	1	127,9	1606	333	464	410	448	439	741	3341	638
16-08-94	23h15	2	126,6	1313	271	448	394	434	428	713	2868	585
17-08-94	9h15	12	127,5	730	187	363	351	407	505	687	1685	483
17-08-94	12h15	15	125,3	702	175	334	354	407	573	719	1620	488
17-08-94	17h15	20	125,5	683	159	301	350	400	629	668	1459	474
17-08-94	22h45	25,5	127,5	626	137	279	334	397	703	600	1381	464
18-08-94	13h00	39,75	124,3	666	98	239	300	587	720	596	1116	470
18-08-94	14h45	41,5	123,4	641	105	240	305	687	719	610	1523	507
18-08-94	17h15	44	123,5	622	99	236	276	1146	718	552	1361	562
18-08-94	22h15	49	120,5	613	93	234	646	2584	681	555	1237	850
19-08-94	00h30	51,25	121,3	603	90	227	1168	2949	670	592	1556	1006
19-08-94	1h15	52	123,5	592	87	225	1428	3107	662	659	1246	1072
19-08-94	11h15	62	116,4	578	77	174	4199	4247	709	530	1356	1703
19-08-94	14h30	65,25	114,3	562	76	216	4397	4346	757	501	1367	1763
19-08-94	16h45	67,5	111,6	583	76	357	4414	4415	802	500	1385	1806
19-08-94	23h45	74,5	105,5	623	71	783	4482	4411	929	564	1270	1910
20-08-94	9h45	84,5	92,1	714	73	1443	5012	4612	1130	601	1446	2192

ESSAI CB4

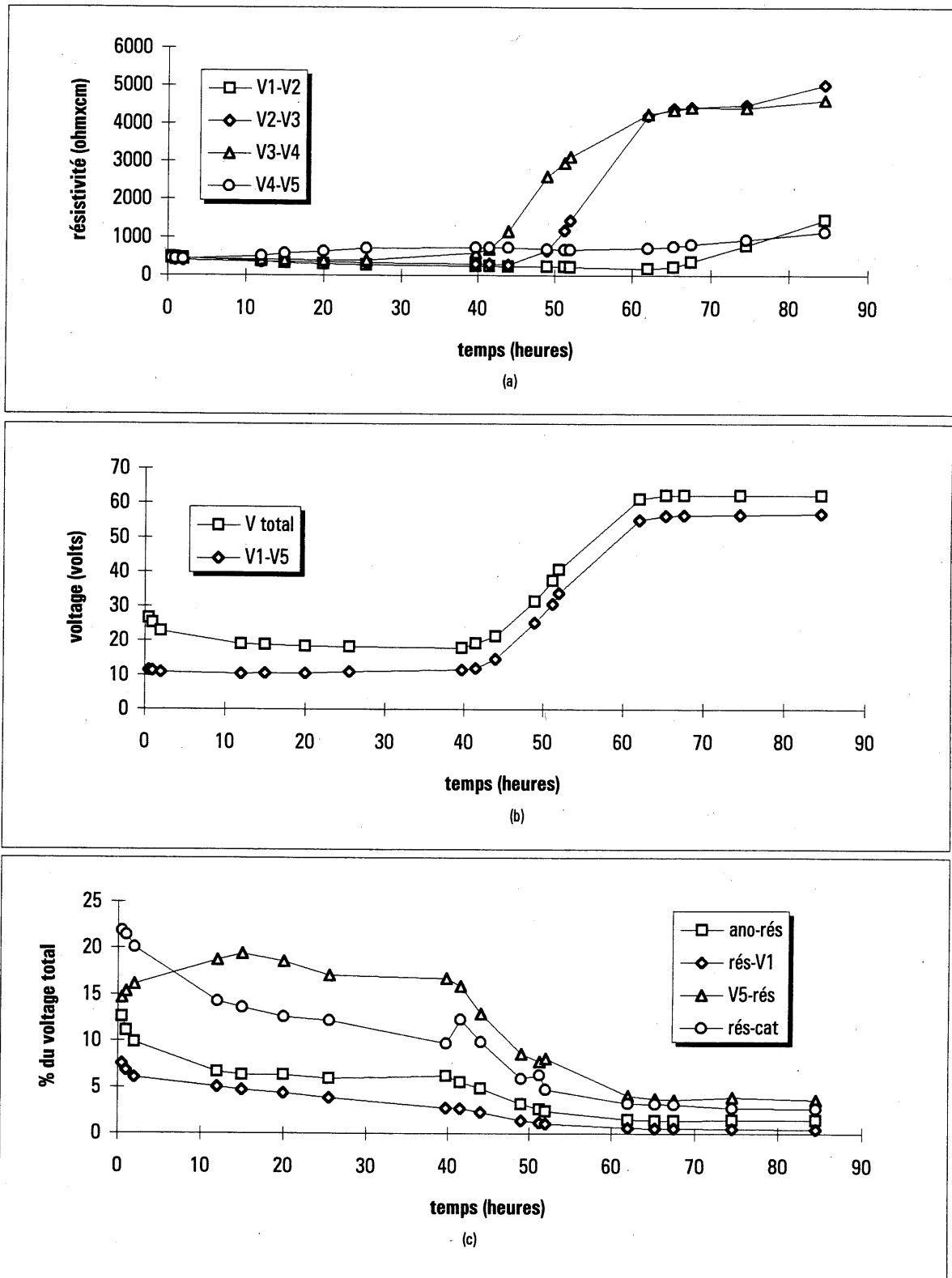


Figure D.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB4

section: 71,9cm²

longueur: 16,5cm

TABLEAU D.5 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE				pH bécher cathode
						pH		conductivité (umho)		
						bas	haut	bas	haut	
0,5	1,61	225	2	0	0					
1	1,52	453	3	0	0					
2	1,38	906	6	2	2	2,93	2,89	1850	1520	2,27
12	1,15	5451	33	24	26	3,38	3,38	2450	2020	2,81
15	1,14	6802	40	8	34					3,03 ≥ 2,73
20	1,11	9057	51	12	46	3,2	3,15	2500	2600	2,90 ≥ 2,74
25,5	1,10	11557	64	14	60					
39,75	1,09	17951	96	34	94	3,61	3,57	4400	4400	3,09 ≥ 2,77
41,5	1,17	18734	100	4	98					
44	1,30	19852	107	4	102					
49	1,91	22061	123	0	102	3,16	3,11	4300	4350	2,90 ≥ 2,66
51,25	2,28	23059	133	0	102					
52	2,47	23394	136	0	102					
62	3,70	27740	198	0	102					
65,25	3,76	29101	221	2	104					
67,5	3,76	30016	237	-17	-17	3,14	3,1	5100	5100	2,86
74,5	3,76	32751	284	0	-17					
84,5	3,77	36308	345	0	-17	3,33	3,32	6400	6500	3,03

ESSAI CB4

TABLEAU D.6 BILAN DE MASSE

item	dilution	A.A.	volume	ug zinc	% pr total
10	-	-	-	8604	0,13
11	-	-	-	39711	0,62
12	-	-	-	6393	0,10
13	-	-	-	31371	0,49
20	-	-	-	4637	0,07
21	-	-	-	17827	0,28
22	-	-	-	9790	0,15
23	-	-	-	4249	0,07
30	-	-	-	3264	0,05
31	-	-	-	3731	0,06
32	-	-	-	3521	0,05
33	-	-	-	1033	0,02
40	-	-	-	3336	0,05
41	-	-	-	3824	0,06
42	-	-	-	5595	0,09
43	-	-	-	3852	0,06
1 bas	625	182	10	9263	0,14
1 haut	625	105	10	5344	0,08
2 bas	625	229	10	11655	0,18
2 haut	625	165	10	8398	0,13
3 bas	1250	176	10	17039	0,26
3 haut	1250	167	10	16168	0,25
4 bas	3125	130	10	31465	0,49
4 haut	3125	129	10	31223	0,48
5 bas	6250	87	10	42115	0,65
5 haut	6250	92	10	44535	0,69
6 bas	6250	86	10	41631	0,65
6 haut	6250	91	10	44051	0,68
7 bas	6250	74	10	35822	0,56
7 haut	6250	91	10	44051	0,68
cathode	6250	92	502	2235647	34,66
anode	1	134	100	94	0,00
pp cathode	10	187	100	1438	0,02
pp anode	1	136	100	95	0,00
géo cathode	25	99	250	4782	0,07
géo anode	1	210	250	397	0,01
catholyte	15625	92	250	2783428	43,15
anolyte	125	98	100	9478	0,15
Total en gramme				5,57	86,34

Masse de zinc dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 6,45

Masse de zinc dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 6,3

ESSAI CB4

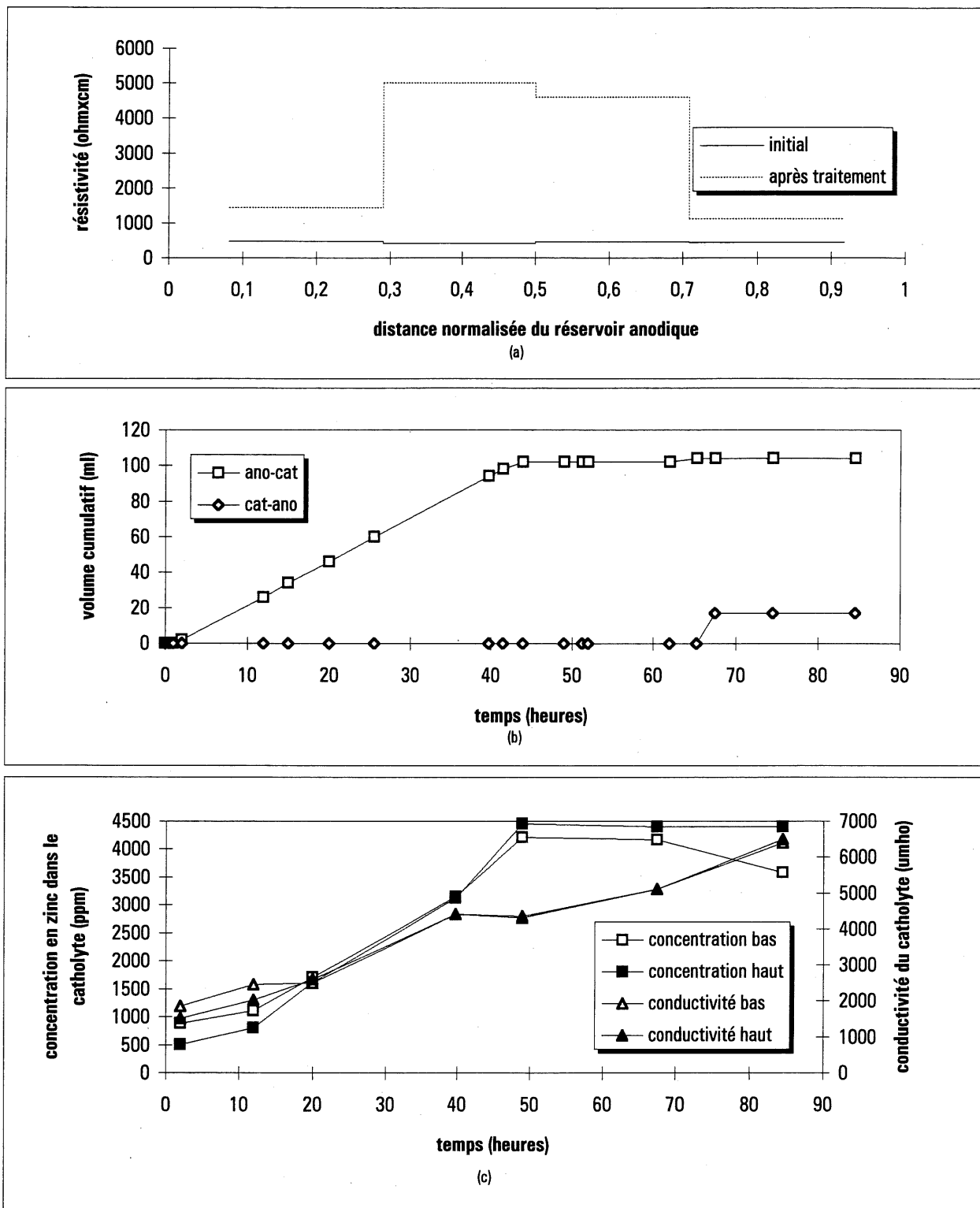


Figure D.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique (b), de la conductivité et de la concentration en zinc dans le catholyte (c).

Annexe E

ESSAI CB5 - sol d'Ascot

Du 28 août au 03 septembre 1994

Me eau

Me
sur sol

Me sol

Paramètres:

Courant: 125 mA suivi d'un voltage contrôlé à 25,7V

Réservoir anodique: CH₃COOH 0,87MRéservoir cathodique: recirculation du catholyte (CH₃COOH 0,87M au départ)

TABLEAU E.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	<i>n.d</i>	<i>4,89</i>	<i>1338</i>	<i>5966</i>	<i>n.d</i>	<i>4519</i>	<i>13169</i>	<i>n.d</i>
<i>sol cont. 2</i>	<i>16,76</i>	<i>4,84</i>	<i>1230</i>	<i>6257</i>	<i>15</i>	<i>4185</i>	<i>10834</i>	<i>57</i>
<i>sol cont. 3</i>	<i>16,87</i>	<i>4,78</i>	<i>1119</i>	<i>6621</i>	<i>0</i>	<i>3971</i>	<i>11768</i>	<i>50</i>
moyenne*	16,82	4,84	1229	6281	8	4225	11924	53

TABLEAU E.2 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

réservoir anode	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir cathode
	43	41	33	31	23	21	13	11	

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
42	20,88	5,27	24	n.d.	n.d.	38	n.d.	n.d.
43	19,07	5,01	26	83	38	70	409	-11
40	18,73	3,84	17	n.d.	n.d.	101	n.d.	n.d.
41	17	3,84	19	2	98	127	8	99
32	17,35	3,9	21	n.d.	n.d.	97	n.d.	n.d.
33	16,45	3,95	23	2	98	99	11	98
30	16,63	3,93	22	n.d.	n.d.	68	n.d.	n.d.
31	16,27	4,06	25	4	98	111	23	97
22	16,55	4,1	26	n.d.	n.d.	81	n.d.	n.d.
23	16,09	4,32	63	162	58	435	1181	56
20	16,85	4,55	106	n.d.	n.d.	675	n.d.	n.d.
21	16,08	4,85	319	1029	48	1781	6174	44
12	17,03	4,71	143	n.d.	n.d.	997	n.d.	n.d.
13	16,67	4,81	299	1161	35	2026	5940	51
10	17,94	4,58	107	n.d.	n.d.	794	n.d.	n.d.
11	18,2	4,68	200	636	42	1383	3372	56
moyenne*	17,36	4,40	90	385	47	555	2140	52

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB5

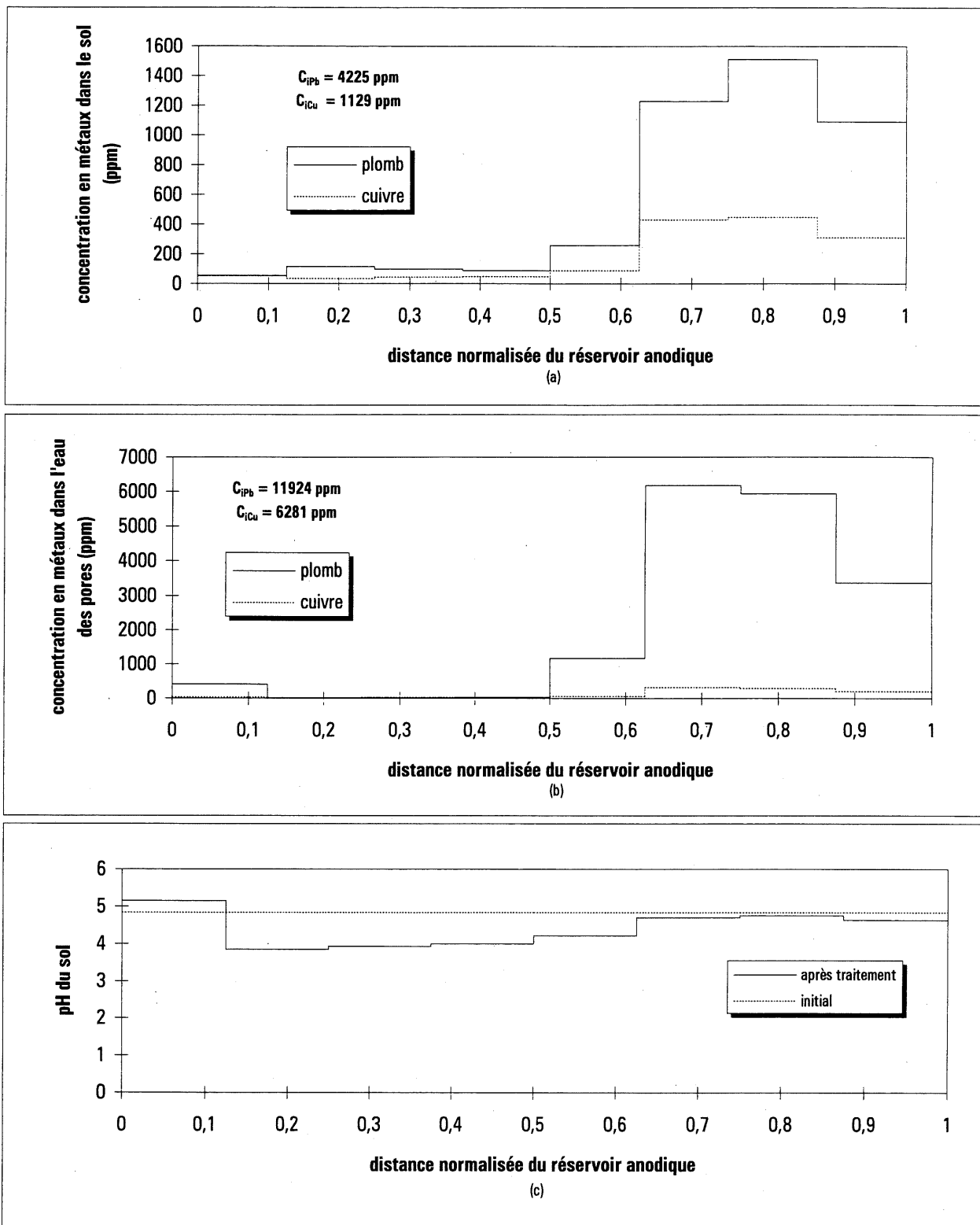


Figure E.1 Distribution du plomb et du cuivre après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB5

TABLEAU E.3 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
28-08-94	15h15	0	3,46	1,79	1,44	1,49	1,56	1,16	2,49	5,59	18,95
28-08-94	15h45	0,5	2,19	1,11	1,38	1,4	1,5	1,07	3,06	5,95	17,77
28-08-94	16h15	1	1,82	0,95	1,37	1,39	1,48	1,06	3,55	5,86	17,59
28-08-94	17h15	2	1,42	0,79	1,28	1,28	1,39	0,99	3,92	5,09	16,29
28-08-94	19h15	4	1,13	0,63	1,27	1,23	1,36	1,03	5,62	4,89	17,23
28-08-94	22h15	7	0,97	0,51	1,24	1,19	1,33	2,39	5,87	4,02	17,62
29-08-94	1h15	10	0,93	0,47	1,17	1,21	1,32	4,06	5,91	3,25	18,48
29-08-94	13h15	22	0,75	0,5	0,7	1,3	1,35	9,34	5,66	2,03	21,78
29-08-94	15h15	24	0,76	0,46	0,6	1,27	1,67	9	5,4	3,08	22,37
29-08-94	22h15	31	0,9	0,29	0,45	1,23	3,77	9,05	5,14	2,11	23,1
30-08-94	9h15	42	0,91	0,26	0,37	1,03	8,37	9,2	4,65	1,91	26,95
30-08-94	9h45	42,5	0,9	0,23	0,31	0,96	8,13	8,3	4,8	1,86	25,7
30-08-94	11h15	44	0,89	0,22	0,29	0,89	9,11	7,98	4,49	1,63	25,74
30-08-94	15h15	48	0,88	0,18	0,25	0,76	11,43	6,77	3,75	1,58	25,82
30-08-94	17h15	50	0,87	0,16	0,22	1,58	11,52	6,17	3,46	1,42	25,75
31-08-94	1h15	58	0,82	0,12	0,14	5,52	9,98	4,56	2,87	1,47	25,86
31-08-94	9h15	66	0,79	0,08	0,1	8,47	8,93	3,37	2,52	1,35	25,96
31-08-94	17h15	74	0,72	0,08	0,1	10,46	7,98	2,51	2,14	1,41	25,76
01-09-94	00h15	81	0,7	0,08	0,13	11,34	7,77	2,05	1,97	1,25	25,8
01-09-94	11h45	92,5	0,69	0,09	1,14	11	7,56	1,78	1,72	1,39	25,74
01-09-94	17h45	98,5	0,68	0,1	1,71	10,85	7,2	1,75	1,47	1,46	25,73
02-09-94	10h45	115	0,67	0,11	3,11	10,68	6,44	1,66	1,3	1,48	25,75
02-09-94	20h45	125,5	0,66	0,11	4,33	10,4	5,67	1,56	1,24	1,44	25,77
02-09-94	23h15	128	0,66	0,11	4,61	10,34	5,47	1,54	1,2	1,43	25,77
03-09-94	12h45	141,5	0,65	0,12	6,04	9,9	4,72	1,45	1,12	1,42	25,79
03-09-94	16h15	145	0,65	0,12	6,34	9,74	4,58	1,46	1,12	1,4	25,79

ESSAI CB5

TABLEAU E.4 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
28-08-94	15h15	0	125	2045	357	232	235	246	185	490	3546	492
28-08-94	15h45	0,5	125,2	1292	221	222	220	236	170	601	3768	461
28-08-94	16h15	1	126,8	1060	187	217	216	230	167	689	3664	450
28-08-94	17h15	2	124	846	159	208	203	221	159	778	3255	426
28-08-94	19h15	4	125	668	125	204	194	214	164	1106	3102	447
28-08-94	22h15	7	124,7	575	102	200	188	210	382	1158	2556	459
29-08-94	1h15	10	125	550	94	188	191	208	647	1163	2062	480
29-08-94	13h15	22	128,7	431	97	109	199	207	1446	1082	1251	549
29-08-94	15h15	24	124	453	92	97	202	265	1447	1071	1969	585
29-08-94	22h15	31	124,5	534	58	73	195	597	1449	1016	1344	602
30-08-94	9h15	42	125	538	52	60	162	1320	1467	915	1212	700
30-08-94	9h45	42,5	112,1	593	51	56	169	1429	1476	1053	1316	744
30-08-94	11h15	44	108,2	608	51	54	162	1660	1470	1021	1194	772
30-08-94	15h15	48	94,4	689	47	53	159	2386	1429	977	1327	888
30-08-94	17h15	50	88,7	725	45	50	351	2560	1386	960	1269	942
31-08-94	1h15	58	67,2	902	44	42	1619	2927	1352	1051	1734	1249
31-08-94	9h15	66	52,5	1112	38	38	3180	3353	1279	1181	2039	1605
31-08-94	17h15	74	42,4	1255	47	47	4862	3710	1180	1242	2637	1971
01-09-94	00h15	81	37,7	1372	53	69	5929	4062	1084	1285	2629	2221
01-09-94	11h45	92,5	34,6	1473	65	663	6266	4307	1025	1223	3185	2414
01-09-94	17h45	98,5	33,7	1491	74	1020	6346	4211	1035	1073	3435	2478
02-09-94	10h45	115	31,54	1569	87	1983	6674	4024	1049	1014	3721	2649
02-09-94	20h45	125,5	29,56	1650	93	2946	6935	3781	1052	1032	3863	2829
02-09-94	23h15	128	29,13	1674	94	3183	6996	3701	1054	1013	3892	2871
03-09-94	12h45	141,5	27,17	1767	110	4471	7182	3424	1064	1014	4144	3080
03-09-94	16h15	145	26,8	1792	111	4757	7163	3368	1086	1028	4142	3123

ESSAI CB5

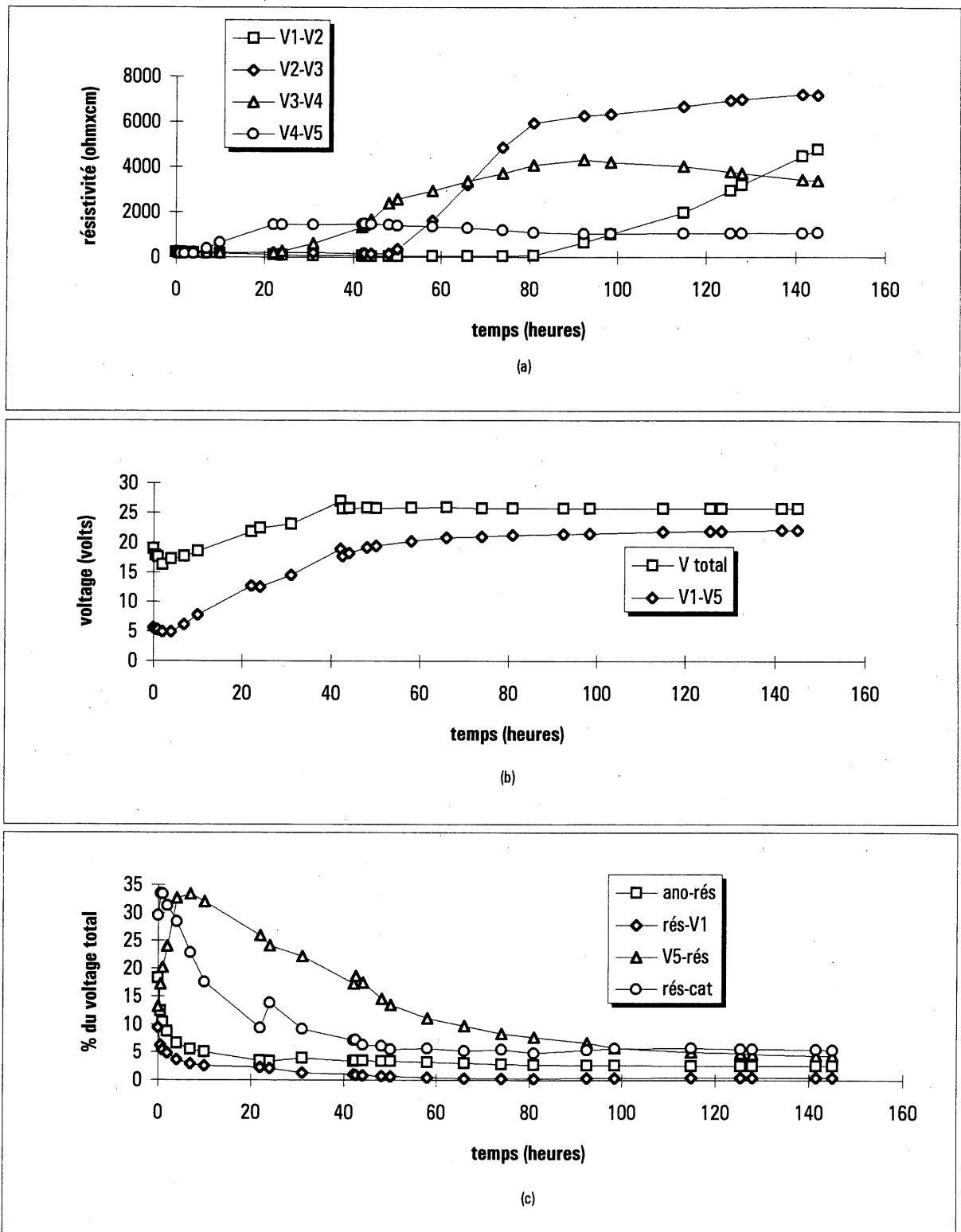


Figure E.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB5

section: 73cm²
longueur: 16,6cm

TABLEAU E.5 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE				ANODE				pH bécher cathode
						pH		conduct. (umho)		pH		conduct. (umho)		
						bas	haut	bas	haut	bas	haut	bas	haut	
0	1,15	0	0	0	0									
0,5	1,08	225	1	0	0									
1	1,07	452	2	10	10									
2	0,99	900	4	0	10									
4	1,04	1800	9	0	10									
7	1,07	3148	15	0	10									
10	1,12	4498	22	20	30	2,89	2,94	1200	1150	0,72	0,76	25000	22000	2,82 > 2,76
22	1,32	9978	52	16	46	3,1	3,11	1900	1900					3,09 > 3,01
24	1,36	10875	58	5	51									3,4 > 3,07
31	1,40	14018	78	17	68									3,34 > 3,06
42	1,63	18968	112	28	96									
42,5	1,56	19182	114	0	96									
44	1,56	19777	118	3	99									
48	1,56	21235	129	3	102									
50	1,56	21894	133	2	104									
58	1,57	24139	149	0	104	3,19	3,19	2750	2800					3,14 > 2,96
66	1,57	25863	162	-6	-6									3,14 > 2,95
74	1,56	27230	172	-8	-14									2,98
81	1,56	28239	179	-6	-20									2,98
92,5	1,56	29736	189	-9	-29									3,1 > 2,99
98,5	1,56	30473	195	-4	-33									3,02 > 2,97
115	1,56	32411	209	-8	-41									3,05
125,5	1,56	33566	217	-7	-48									
128	1,56	33830	219	-2	-50									3,12 > 3,01
141,5	1,56	35198	229	-8	-58									
145	1,56	35538	231	-7	-65	3,13	3,11	3850	3850					3,06

ESSAI CB5

TABLEAU E.6 BILAN DE MASSE

item	dilution	A.A.	volume	conc. Pb	ug Pb	% pr total	dilution	A.A.	conc. Cu	ug Cu	% pr total		
10					104178	1,17				13998	0,54		
11					181467	2,05				26203	1,02		
12					130877	1,48				18804	0,73		
13					265933	3,00				39284	1,52		
20					88570	1,00				13931	0,54		
21					233723	2,63				41876	1,62		
22					10646	0,12				3363	0,13		
23					57036	0,64				8207	0,32		
30					8867	0,10				2883	0,11		
31					14579	0,16				3261	0,13		
32					12723	0,14				2751	0,11		
33					12996	0,15				2967	0,11		
40					13231	0,15				2228	0,09		
41					16673	0,19				2431	0,09		
42					4945	0,06				3106	0,12		
43					9210	0,10				3359	0,13		
1 ano bas	25	89	10	152	1517	0,02	25	315	194	1944	0,08		
1 ano haut	25	64	10	105	1050	0,01	25	268	166	1656	0,06		
1 cat bas	250	47	16	732	11716	0,13	250	41	262	4191	0,16		
1 cat haut	250	34	10	489	4894	0,06	25	321	198	1981	0,08		
2 cat bas	250	62	10	1012	10124	0,11	25	403	248	2485	0,10		
2 cat haut	250	42	10	639	6388	0,07	25	316	195	1950	0,08		
3 cat bas	250	97	10	1666	16662	0,19	250	40	256	2558	0,10		
3 cat haut	250	73	10	1218	12179	0,14	25	328	202	2024	0,08		
4 cat bas	10	37	10	22	218	0,00	1	219	5	54	0,00		
4 cat haut	10	59	10	38	383	0,00	1	217	5	54	0,00		
cathode	6250	43	500		8539019	96,25	625	403		2482770	96,21		
anode	250	43	100		68312	0,77	1	152		293	0,01		
pp cathode	1	150	100		1055	0,01	10	198		3851	0,15		
pp anode	1	9	100		25	0,00	1	11		12	0,00		
géo cathode	10	59	250		9755	0,11	10	64		2939	0,11		
géo anode	1	124	250		2163	0,02	1	148		713	0,03		
catholyte	25	156	500		137396	1,55	1	513		5071	0,20		
anolyte	25	184	250		81489	0,92	25	189		22948	0,89		
Total en gramme					10,07	113,51	Total en gramme					2,73	105,64
% retracé p/r à contamination visée:						97,77	% retracé p/r à contamination visée:						86,54

Masse de plomb dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 8,87g

Masse de plomb dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 10,3g

Masse de cuivre dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 2,58g

Masse de cuivre dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 3,15g

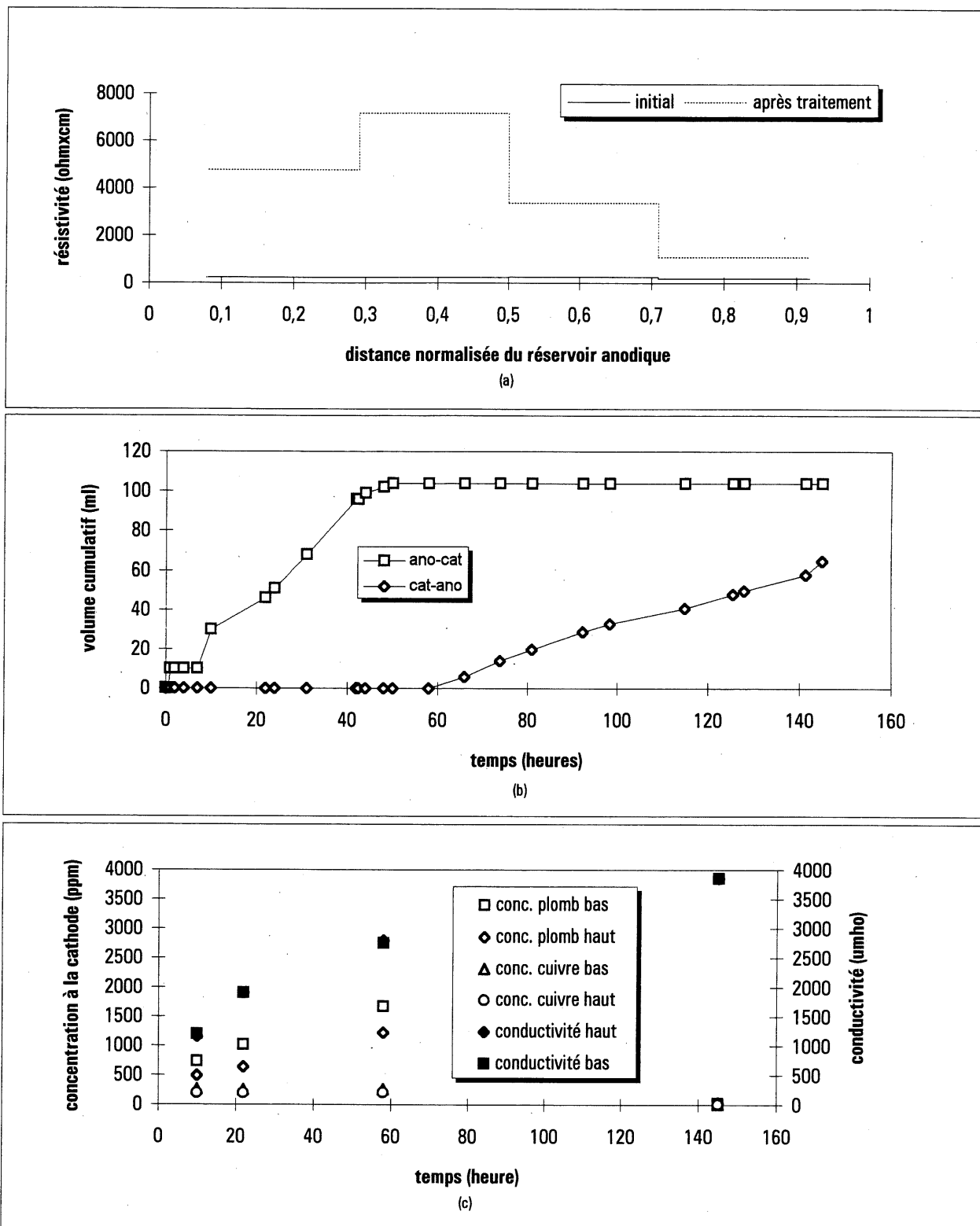


Figure E.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique(b), de la concentration du plomb et du cuivre et de la conductivité dans le catholyte (c).

Annexe F

ESSAI CB6 - sol d'Ascot

Du 28 août au 02 septembre 1994

Me eau

Me
sur sol

Me sol

Paramètres:

Courant: 125 mA suivi d'un voltage contrôlé à 25,7V

Réservoir anodique: CH₃COOH 0,87MRéservoir cathodique: recirculation du catholyte (CH₃COOH 0,87M au départ)

TABLEAU F.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	<i>20,54</i>	<i>4,89</i>	<i>1125</i>	<i>4922</i>	<i>10</i>	<i>3919</i>	<i>11768</i>	<i>38</i>
<i>sol cont. 2</i>	<i>20,74</i>	<i>4,85</i>	<i>1015</i>	<i>5106</i>	<i>-4</i>	<i>3351</i>	<i>9900</i>	<i>39</i>
<i>sol cont. 3</i>	<i>21,29</i>	<i>4,88</i>	<i>1112</i>	<i>5352</i>	<i>-2</i>	<i>4378</i>	<i>11301</i>	<i>45</i>
moyenne*	20,86	4,87	1084	5127	1	3883	10990	41

TABLEAU F.2 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

réservoir	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir
anode	43	41	33	31	23	21	13	11	cathode

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
42	20,05	5,37	44	n.d.	n.d.	77	n.d.	n.d.
43	18,99	5,32	43	226	-1	124	433	34
40	19,46	3,92	11	n.d.	n.d.	119	n.d.	n.d.
41	18,41	3,95	9	8	84	108	13	98
32	18,95	3,96	16	n.d.	n.d.	89	n.d.	n.d.
33	18,36	3,95	18	7	93	97	14	97
30	18,84	4,02	19	n.d.	n.d.	107	n.d.	n.d.
31	18,38	3,93	21	7	94	135	20	97
22	18,76	4,08	24	n.d.	n.d.	130	n.d.	n.d.
23	18,54	4,11	29	11	93	178	43	96
20	18,59	4,34	70	n.d.	n.d.	426	n.d.	n.d.
21	18,26	4,66	193	360	66	832	1872	59
12	18,5	4,71	177	n.d.	n.d.	1074	n.d.	n.d.
13	18,22	4,93	395	1201	45	1894	6407	38
10	17,98	4,66	168	n.d.	n.d.	924	n.d.	n.d.
11	16,79	4,78	390	986	58	1405	4866	42
moyenne*	18,57	4,42	102	351	55	482	1708	49

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB6

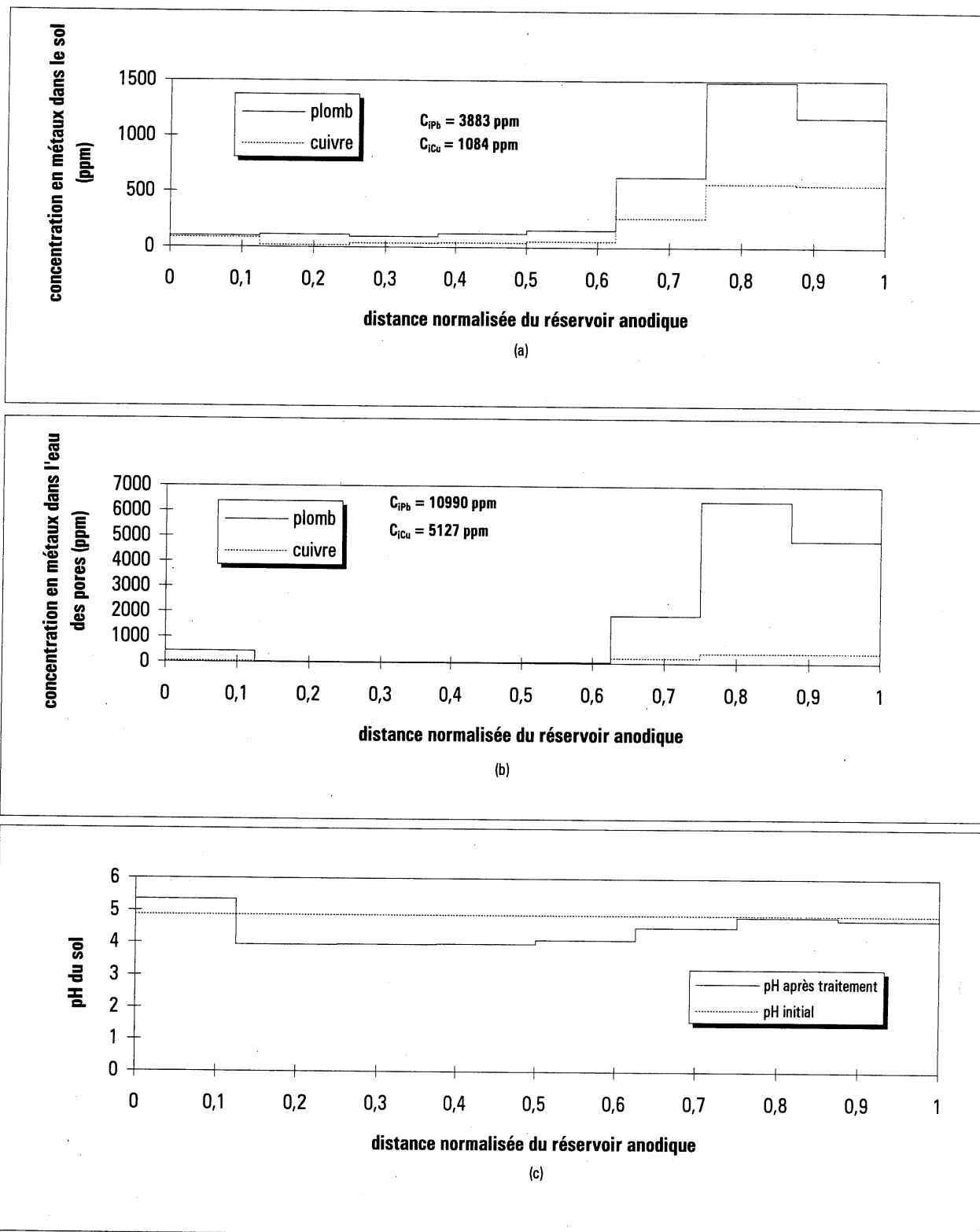


Figure F.1 Distribution du plomb et du cuivre après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB6

TABLEAU F.3 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
28-08-94	17h30	0	2,4	1,76	1,33	1,3	1,29	1,34	1,94	4,29	16,06
28-08-94	18h00	0,5	2,14	1,08	1,31	1,26	1,27	1,33	2,1	4,72	15,23
28-08-94	18h30	1	1,77	0,8	1,38	1,26	1,28	1,34	2,24	4,46	14,58
28-08-94	19h30	2	1,44	0,56	1,38	1,23	1,27	1,32	3,06	4,68	14,98
28-08-94	22h30	5	1,1	0,43	1,29	1,17	1,22	1,28	4,68	4,1	15,34
29-08-94	1h00	7,5	0,87	0,53	1,19	1,15	1,18	1,95	5,2	3,72	15,84
29-08-94	12h30	19	0,74	0,46	0,79	1,14	1,14	7,43	5,63	2,04	19,43
29-08-94	15h00	21,5	0,86	0,35	0,72	1,12	1,13	8,37	5,62	2,97	21,25
29-08-94	22h00	28,5	0,88	0,28	0,61	0,98	3,14	9,1	5,34	2,14	22,63
30-08-94	8h30	39	0,87	0,28	0,38	0,77	8,66	9,1	4,93	1,99	27,1
30-08-94	9h30	40	0,85	0,26	0,29	0,62	8,72	7,7	4,34	2,13	25,7
30-08-94	11h00	41,5	0,84	0,25	0,27	0,58	9,72	7,34	4,13	1,9	25,13
30-08-94	15h30	46	0,82	0,2	0,22	1,15	12,13	6,24	3,46	1,45	25,8
30-08-94	17h30	48	0,81	0,18	0,21	2,42	11,75	5,79	3,22	1,37	25,85
31-08-94	1h30	56	0,75	0,13	0,18	6,18	10,08	4,35	2,48	1,59	25,83
31-08-94	9h30	64	0,7	0,1	0,14	9,22	8,95	3,35	1,92	1,41	25,91
31-08-94	17h00	71,5	0,67	0,11	0,15	10,36	8,57	2,75	1,7	1,31	25,73
01-09-94	00h00	78,5	0,65	0,1	0,43	10,76	8,43	2,47	1,58	1,2	25,74
01-09-94	11h30	90	0,64	0,08	1,89	10,2	8	2,2	1,36	1,3	25,8
01-09-94	17h30	96	0,63	0,08	2,47	10,03	7,66	2,09	1,33	1,27	25,71
02-09-94	10h00	112,5	0,63	0,07	3,74	10,01	6,73	2,05	1,21	1,19	25,74
02-09-94	17h30	120	0,62	0,08	4,47	9,97	6,25	1,93	1,16	1,14	25,74
02-09-94	18h30	121	0,63	0,08	4,54	9,95	6,16	1,92	1,15	1,15	25,74

ESSAI CB6

TABLEAU F.4 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
28-08-94	17h30	0	125	1418	351	214	205	203	214	382	2721	417
28-08-94	18h00	0,5	124,4	1271	216	212	200	201	213	415	3008	397
28-08-94	18h30	1	128,3	1019	155	216	194	197	208	429	2756	369
28-08-94	19h30	2	125	851	112	222	194	200	210	602	2969	389
28-08-94	22h30	5	124,5	653	86	208	185	193	205	925	2611	400
29-08-94	1h00	7,5	123,3	521	107	194	184	189	315	1037	2392	417
29-08-94	12h30	19	123,5	443	93	129	182	182	1199	1121	1310	511
29-08-94	15h00	21,5	123,8	513	70	117	178	180	1347	1117	1902	557
29-08-94	22h00	28,5	124,1	524	56	99	156	499	1461	1059	1367	592
30-08-94	8h30	39	123,9	519	56	62	122	1378	1464	979	1274	710
30-08-94	9h30	40	103,5	607	63	56	118	1661	1483	1032	1632	806
30-08-94	11h00	41,5	99,6	623	63	55	115	1924	1469	1020	1513	819
30-08-94	15h30	46	84,4	718	59	52	269	2833	1473	1008	1362	992
30-08-94	17h30	48	78,8	759	57	54	605	2939	1464	1005	1379	1065
31-08-94	1h30	56	59,7	928	54	61	2040	3328	1452	1022	2112	1404
31-08-94	9h30	64	47,2	1096	53	60	3850	3737	1415	1001	2369	1781
31-08-94	17h00	71,5	41,1	1204	67	73	4968	4110	1334	1018	2527	2031
01-09-94	00h00	78,5	37,7	1274	66	229	5625	4407	1306	1031	2524	2216
01-09-94	11h30	90	33	1433	60	1152	6092	4778	1329	1014	3124	2537
01-09-94	17h30	96	31,48	1479	63	1578	6280	4796	1323	1039	3199	2650
02-09-94	10h00	112,5	29,18	1595	60	2577	6761	4546	1400	1020	3234	2862
02-09-94	17h30	120	28,1	1630	71	3199	6993	4384	1369	1016	3217	2972
02-09-94	18h30	121	27,56	1689	72	3313	7116	4405	1388	1026	3309	3031

ESSAI CB6

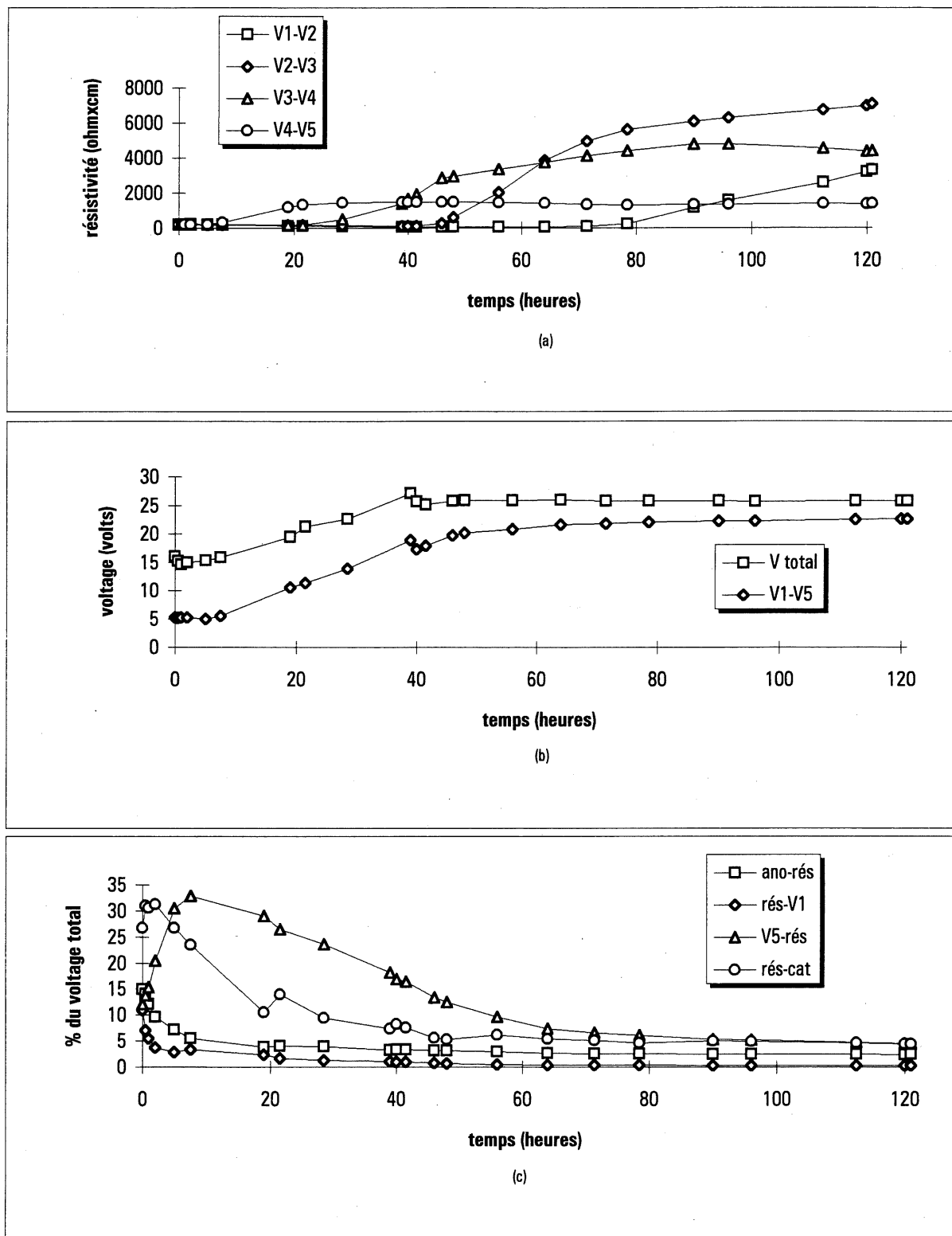


Figure F.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB6

section: 74,3cm²

longueur: 17,7cm

TABLEAU F.5 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE				ANODE				pH bécher cathode
						pH		conduct. (umho)		pH		conduct. (umho)		
						bas	haut	bas	haut	bas	haut	bas	haut	
0	0,97	0	0	0	0									
0,5	0,92	224	1	0	0									
1	0,88	452	2	0	0									
2	0,91	902	4	0	0									
5	0,93	2250	9	0	0									
7,5	0,96	3367	14	0	0									
19	1,18	8511	39	0	0	3,08	3,11	1850	1900	0,6	0,51	43000	46000	3,05 ≥ 2,99
21,5	1,29	9631	46	23	23									
28,5	1,37	12769	65	14	37									3,35 ≥ 3,04
39	1,64	17474	97	26	63									3,30 ≥ 3,07
40	1,56	17885	100	0	63									
41,5	1,52	18433	104	1	64									
46	1,56	19924	115	2	66									
48	1,57	20511	119	0	66									
56	1,57	22505	133	0	66	3,07	3,12	2400	2550					3,08 ≥ 2,99
64	1,57	24045	144	0	66									3,06 ≥ 3,01
71,5	1,56	25237	153	-2	-2									3,04
78,5	1,56	26230	160	-4	-6									3,11 ≥ 2,98
90	1,56	27693	171	-5	-11									3,13 ≥ 2,98
96	1,56	28390	176	-8	-19									3,07 ≥ 2,95
112,5	1,56	30191	188	-9	-28									3,04
120	1,56	30965	194	-7	-35									
121	1,56	31065	195	-1	-36					0,47	0,37	80000	80000	3,02

ESSAI CB6

TABLEAU F.6 BILAN DE MASSE

item	dilution	A.A.	volume	conc. Pb	ug Pb	% pr total	dilution	A.A.	conc. Cu	ug Cu	% pr total		
10					121279	1,49				22109	0,97		
11					184460	2,26				51244	2,25		
12					141002	1,73				23216	1,02		
13					248632	3,05				51895	2,28		
20					55919	0,69				9143	0,40		
21					109154	1,34				25290	1,11		
22					17068	0,21				3110	0,14		
23					23308	0,29				3798	0,17		
30					14009	0,17				2432	0,11		
31					17663	0,22				2727	0,12		
32					11678	0,14				2159	0,09		
33					12685	0,16				2404	0,11		
40					15647	0,19				1467	0,06		
41					14232	0,17				1170	0,05		
42					10106	0,12				5774	0,25		
43					16301	0,20				5599	0,25		
1 ano bas	250	34	10	489	4894	0,06	250	65	409	4093	0,18		
1 ano haut	25	51	10	81	807	0,01	250	44	280	2804	0,12		
1 cat bas	250	63	10	1031	10311	0,13	250	48	305	3049	0,13		
1 cat haut	250	46	10	714	7136	0,09	25	343	212	2116	0,09		
2 cat bas	250	92	10	1573	15728	0,19	250	51	323	3233	0,14		
2 cat haut	250	58	10	938	9377	0,12	25	313	193	1932	0,08		
3 ano bas	25	180	10	322	3217	0,04	250	41	262	2619	0,12		
3 ano haut	25	142	10	251	2507	0,03	250	40	256	2558	0,11		
cathode	6250	43	500		8539019	104,73	625	365		2245651	98,64		
anode	250	108	100		187084	2,29	1	350		689	0,03		
pp cathode	1	45	100		278	0,00	10	111		2767	0,12		
pp anode	1	9	100		9	0,00	1	21		56	0,00		
géo cathode	10	74	250		12496	0,15	10	138		6633	0,29		
géo anode	1	163	250		2876	0,04	1	440		2171	0,10		
catholyte	25	173	500		152928	1,88	10	131		12568	0,55		
anolyte	25	155	250		68241	0,84	25	440		54273	2,38		
Total en gramme					10,03	123,02	Total en gramme					2,56	112,48
% retracé p/r à contamination visée:						97,38	% retracé p/r à contamination visée:						81,29

Masse de plomb dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 8,2g
Masse de plomb dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 10,3g

Masse de cuivre dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 2,28g
Masse de cuivre dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 3,15g

ESSAI CB6

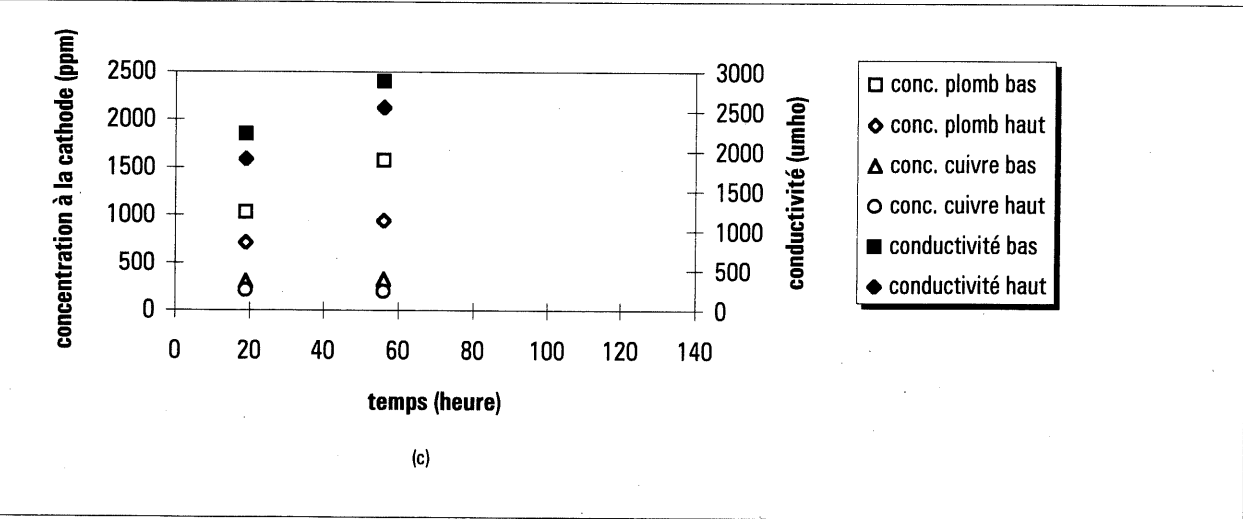
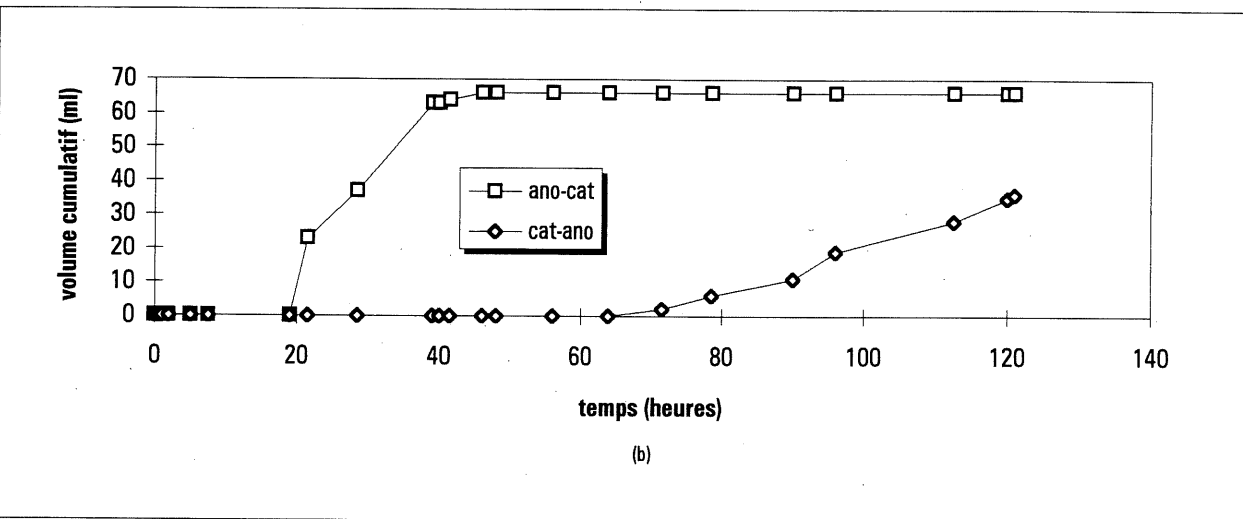
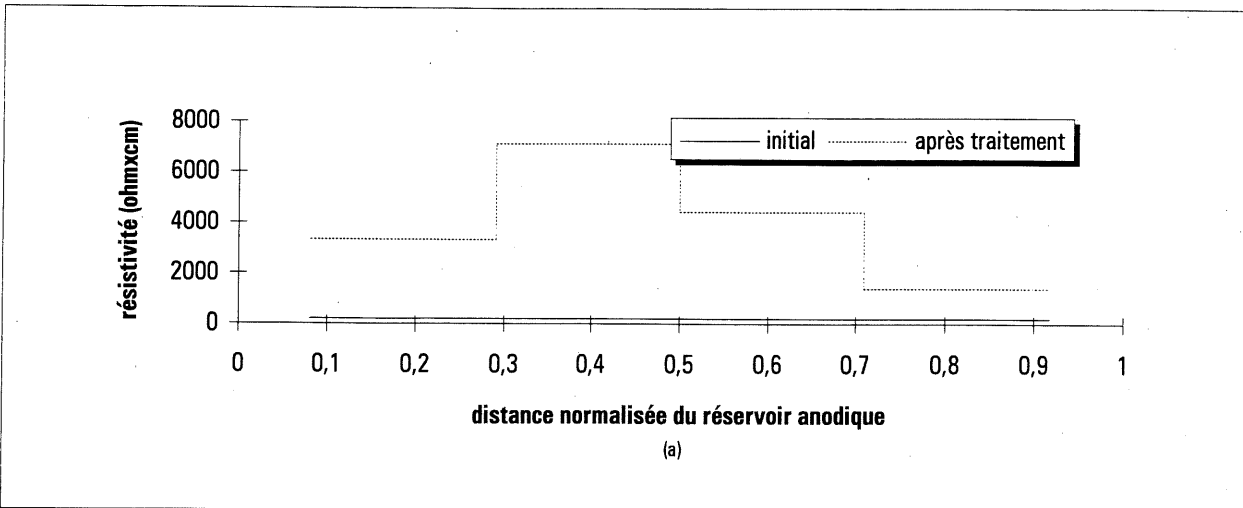


Figure F.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique(b), de la concentration du plomb et du cuivre et de la conductivité dans le catholyte (c).

Annexe G

TABLEAU G.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	16,89	4,58	1466	7036	19	5579	22103	33
<i>sol cont. 2</i>	18,79	4,81	1559	6326	24	5347	20733	27
<i>sol cont. 3</i>	17,47	4,77	1556	6363	29	5040	21189	27
moyenne*	17,72	4,72	1527	6575	24	5322	21342	29

réservoir	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir
anode	43	41	33	31	23	21	13	11	cathode

TABLEAU G.2 CARACTÉRISATION DU SOL À t=114h

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
42	24,33	4,19	73	359	-19	16	125	-91
40	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
32	16,65	4,05	206	1496	-21	1112	8971	-34
30	15,67	4,34	1043	n.d.	n.d.	3765	n.d.	n.d.
22	16,26	4,63	1180	6326	13	3113	22103	-15
20	17,14	5,08	973	n.d.	n.d.	2270	n.d.	n.d.
12	17,04	5,22	981	2769	52	2230	8012	39
10	18,69	4,89	501	n.d.	n.d.	1785	n.d.	n.d.

note: l'échantillonnage a été fait entre 5 et 10cm de profondeur

TABLEAU G.3 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
42	19,59	3,18	17	n.d.	n.d.	5	n.d.	n.d.
43	16,48	3,00	18	1	99	9	3	95
40	17,31	3,23	33	n.d.	n.d.	96	n.d.	n.d.
41	14,97	3,23	33	1	100	74	4	99
32	17,78	3,41	34	n.d.	n.d.	56	n.d.	n.d.
33	15,28	3,42	35	2	99	54	7	98
30	16,40	3,60	42	n.d.	n.d.	79	n.d.	n.d.
31	15,09	3,52	42	8	97	90	30	95
22	16,61	4,03	117	n.d.	n.d.	369	n.d.	n.d.
23	14,86	4,21	219	474	68	908	3489	43
20	16,00	4,61	446	n.d.	n.d.	1818	n.d.	n.d.
21	15,06	4,51	494	1446	56	2059	5362	61
12	17,86	4,77	290	n.d.	n.d.	1668	n.d.	n.d.
13	16,48	4,86	400	1309	46	2028	6048	51
10	16,05	4,77	272	n.d.	n.d.	2023	n.d.	n.d.
11	14,36	4,85	372	1746	33	2289	8560	46
moyenne*	16,26	3,95	179	623	53	852	2938	53

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

Échantillonnage dans la zone 32-33 (au centre)

plomb

haut

365ppm
505ppm
616ppm

bas

cuivre

haut

98ppm
94ppm
96ppm

bas

Échantillonnage dans la zone 12-13 (au centre)

plomb

haut

3288ppm
3266ppm
2985ppm

bas

cuivre

haut

1044ppm
1059ppm
796ppm

bas

Figure G.1 Concentration en plomb et en cuivre dans deux carottes échantillonnées à t=166,5h

Concentration en plomb (ppm)

CATHODE				
2616		2071		2645
525	556	611	751	532
24		17		55
ANODE				

Concentration en cuivre (ppm)

CATHODE				
393		412		430
173	160	182	556	115
13		16		24
ANODE				

Figure G.2 Homogénéité du traitement sur un plan horizontal situé à 12,5cm de la base de l'échantillon

Concentration en plomb (ppm)

CATHODE				
565		2705		1901
135	364	123	253	781
14		20		46
ANODE				

Concentration en cuivre (ppm)

CATHODE				
100		450		270
78	122	70	92	228
35		12		19
ANODE				

Figure G.3 Homogénéité du traitement sur un plan horizontal situé à 37,5cm de la base de l'échantillon

ESSAI CB7

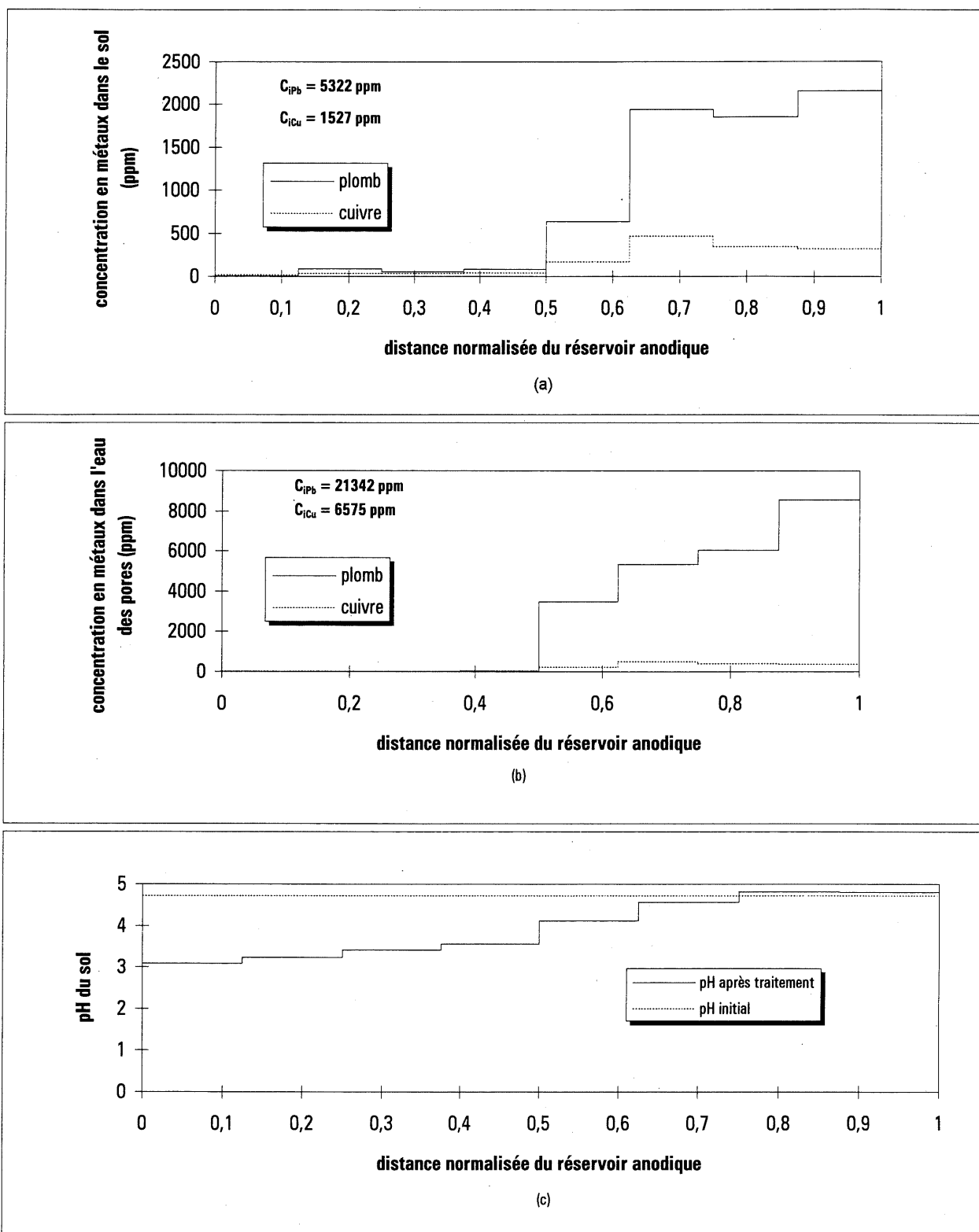


Figure G.4 Distribution du plomb et du cuivre après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

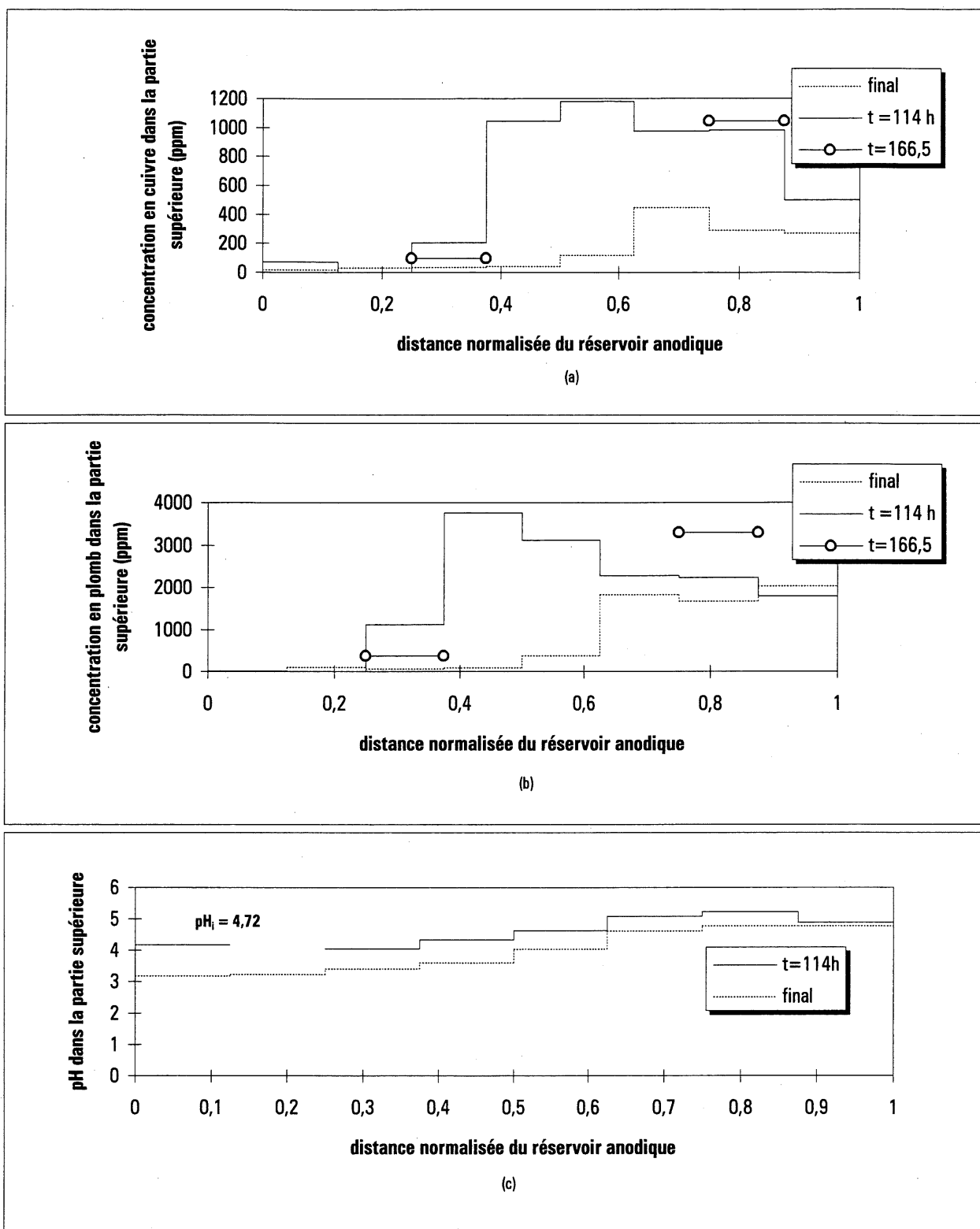


Figure G.5 Concentration en cuivre (a), en plomb (b) et pH en fonction du temps et de la position dans la partie supérieure

ESSAI CB7

TABLEAU G.4 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	res-ano (V)	V1-res (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	V6-V5 (V)	V7-V6 (V)	res-V7 (V)	cat-res (V)	cat-ano (V)
30-09-94	12h00	0	4,51	1,2	1,36	1,48	1,48	1,47	1,42	1,32	1,16	6,73	22,31
30-09-94	13h00	1	4,01	1,19	1,37	1,46	1,48	1,46	1,42	1,31	1,27	7,11	22,18
30-09-94	18h30	6,5	2,65	0,89	1,37	1,43	1,44	1,41	1,35	1,27	1,66	8,2	21,9
01-10-94	00h00	12	2,08	0,78	1,37	1,39	1,41	1,36	1,31	1,26	2,24	9,02	22,42
01-10-94	11h00	23	1,78	0,41	1,4	1,34	1,33	1,32	1,27	1,34	3,64	9,81	23,28
01-10-94	16h30	28,5	1,68	0,32	1,41	1,31	1,32	1,3	1,25	1,78	4,24	9,47	23,96
02-10-94	1h00	37	1,56	0,25	1,37	1,3	1,3	1,29	1,24	3,87	4,2	7,98	24,57
02-10-94	12h30	48,5	1,46	0,22	1,3	1,3	1,29	1,27	1,2	6,45	4,1	7,08	25,86
02-10-94	15h30	50,5	1,45	0,22	1,29	1,31	1,3	1,29	1,23	7	4,26	7,21	26,74
03-10-94	00h00	59	1,4	0,21	1,21	1,31	1,3	1,28	1,21	8,69	4,32	6,51	27,63
03-10-94	11h30	70,5	1,34	0,2	1,02	1,39	1,29	1,29	2,41	9,76	4,25	5,9	29
03-10-94	17h45	76,75	1,31	0,2	0,94	1,44	1,29	1,3	3,49	9,84	4,21	5,79	30,04
04-10-94	00h30	83,5	1,3	0,21	0,86	1,45	1,27	1,28	4,64	9,79	4,14	5,37	30,57
04-10-94	11h00	94	1,32	0,15	0,76	1,45	1,26	1,28	6,37	9,65	4,01	5,07	31,48
04-10-94	21h30	104,5	1,24	0,18	0,72	1,41	1,25	1,26	7,96	9,6	3,95	4,89	32,58
05-10-94	7h00	114	1,2	0,17	0,72	1,34	1,27	1,28	9,36	9,56	3,82	4,71	33,55
05-10-94	12h30	119,5	1,2	0,17	0,72	1,32	1,31	1,64	9,81	9,71	3,87	4,68	34,6
05-10-94	18h00	125	1,18	0,18	0,72	1,26	1,33	2,34	9,89	9,72	3,83	4,99	35,65
05-10-94	23h00	130	1,24	0,18	0,69	1,21	1,31	3,02	9,67	9,52	3,75	4,91	35,8
06-10-94	11h00	142	1,16	0,16	0,7	1,09	1,34	4,68	9,61	9,33	3,6	4,41	36,3
06-10-94	16h00	147	1,16	0,16	0,69	1,04	1,36	5,42	9,61	9,3	3,61	4,31	36,9
06-10-94	21h00	152	1,15	0,16	0,7	0,96	1,4	6,12	9,68	9,28	3,59	4,18	37,5
07-10-94	10h30	165,5	1,14	0,17	0,72	0,87	1,47	9,07	10,35	9,79	3,64	3,95	41,4
07-10-94	13h00	168	1,11	0,19	0,74	0,88	1,49	10,35	10,71	10,03	3,71	4,35	43,75
07-10-94	23h30	178,5	1,1	0,16	0,71	0,76	4,03	18,24	9,36	9,34	3,5	4,05	51,5
08-10-94	8h30	187,5	1,1	0,15	0,67	0,7	12,51	20,79	8,34	8,73	3,25	3,8	60,3
08-10-94	22h00	201	0,97	0,14	0,56	0,6	22,4	18,91	6,1	6,88	2,44	3,17	62,65
09-10-94	7h00	210	0,88	0,13	0,58	3,22	22,61	17,4	5,7	6,57	2,14	3,09	62,55
10-10-94	00h30	223	0,84	0,09	0,52	12,87	19,82	13,96	4,29	5,58	1,7	2,77	62,6
10-10-94	10h30	233	0,82	0,07	0,5	17,51	18,71	12,23	3,59	4,99	1,44	2,6	62,6
10-10-94	22h30	245	0,76	0,08	1,32	20,59	18,09	10,29	3,25	4,48	1,3	2,54	62,7
11-10-94	12h30	259	0,76	0,08	4,61	19,9	17,91	8,68	3,02	4,12	1,14	2,38	62,7
11-10-94	17h00	263,5	0,74	0,08	5,72	19,37	17,78	8,24	3,01	4,02	1,13	2,32	62,8
11-10-94	21h00	267,5	0,73	0,09	6,8	19,03	17,63	7,9	3	3,95	1,12	2,32	62,7
12-10-94	12h00	282,5	0,72	0,08	10,65	17,63	16,81	6,7	2,86	3,72	1,01	2,24	62,7
12-10-94	23h30	294	0,72	0,09	13,08	17,31	15,97	5,95	2,69	3,53	0,9	2,14	62,65
13-10-94	13h30	308	0,65	0,12	14,95	17,4	15,56	4,96	2,55	3,27	0,88	2,16	62,6
14-10-94	9h00	327,5	0,72	1,05	14,56	18,25	15,55	4,11	2,42	3,07	0,77	1,94	62,6
14-10-94	17h00	335,5	0,72	1,24	14,63	18,47	15,28	4,04	2,47	2,95	0,78	1,97	62,6
15-10-94	11h10	353,5	0,74	1,43	14,71	19,1	14,86	3,75	2,6	2,96	0,8	1,86	63,05

ESSAI CB7

TABEAU G.5 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (A)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	V6-V5 Ohmxcm	V7-V6 Ohmxcm	rés-V7 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
30-09-94	12h00	0	3,06	501	189	180	196	196	194	188	175	182	748	295
30-09-94	13h00	1	3,04	448	188	182	194	197	194	189	174	201	795	295
30-09-94	18h30	6,5	3,16	285	135	175	183	184	181	173	163	253	882	281
01-10-94	00h00	12	3,04	233	123	182	185	188	181	174	168	354	1009	299
01-10-94	11h00	23	3,03	200	65	187	179	178	176	170	179	578	1101	311
01-10-94	16h30	28,5	3,04	188	51	188	174	176	173	166	237	671	1059	319
02-10-94	1h00	37	3,05	174	39	182	173	173	171	165	514	662	890	326
02-10-94	12h30	48,5	3,03	164	35	174	174	172	170	160	862	651	794	345
02-10-94	15h30	50,5	3,03	163	35	172	175	174	172	164	935	676	809	357
03-10-94	00h00	59	3,03	157	33	162	175	174	171	162	1161	686	730	369
03-10-94	11h30	70,5	3,04	150	32	136	185	172	172	321	1300	672	660	386
03-10-94	17h45	76,75	3,03	147	32	126	192	172	174	466	1315	668	650	401
04-10-94	00h30	83,5	3,03	146	33	115	194	170	171	620	1308	657	603	408
04-10-94	11h00	94	3,03	148	24	102	194	168	171	851	1289	637	569	421
04-10-94	21h30	104,5	3,04	139	28	96	188	166	168	1060	1278	625	547	434
05-10-94	7h00	114	3,03	135	27	96	179	170	171	1250	1277	606	529	448
05-10-94	12h30	119,5	3,03	135	27	96	176	175	219	1311	1297	614	525	462
05-10-94	18h00	125	3,03	132	29	96	168	178	313	1321	1299	608	560	476
05-10-94	23h00	130	3,03	139	29	92	162	175	403	1292	1272	595	551	478
06-10-94	11h00	142	3,03	130	25	94	146	179	625	1284	1246	571	495	485
06-10-94	16h00	147	3,03	130	25	92	139	182	724	1284	1242	573	484	493
06-10-94	21h00	152	3,03	129	25	94	128	187	818	1293	1240	570	469	501
07-10-94	10h30	165,5	3,03	128	27	96	116	196	1212	1383	1308	578	443	553
07-10-94	13h00	168	3,03	125	30	99	118	199	1383	1431	1340	589	488	584
07-10-94	23h30	178,5	3,03	123	25	95	102	538	2437	1250	1248	556	454	688
08-10-94	8h30	187,5	3,03	123	24	90	94	1671	2777	1114	1166	516	426	806
08-10-94	22h00	201	2,62	126	26	87	93	3461	2922	942	1063	448	411	968
09-10-94	7h00	210	2,34	128	27	100	557	3911	3010	986	1137	440	449	1082
10-10-94	00h30	223	1,95	146	22	108	2672	4114	2898	891	1158	419	483	1300
10-10-94	10h30	233	1,83	152	18	111	3873	4139	2705	794	1104	378	483	1385
10-10-94	22h30	245	1,63	159	24	328	5113	4493	2555	807	1113	384	530	1557
11-10-94	12h30	259	1,51	171	25	1236	5335	4801	2327	810	1104	363	536	1681
11-10-94	17h00	263,5	1,41	178	27	1642	5561	5104	2366	864	1154	385	559	1803
11-10-94	21h00	267,5	1,39	179	31	1980	5542	5134	2301	874	1150	388	567	1826
12-10-94	12h00	282,5	1,28	191	30	3368	5575	5316	2119	904	1176	380	595	1983
12-10-94	23h30	294	1,21	202	36	4376	5791	5343	1991	900	1181	358	601	2096
13-10-94	13h30	308	1,15	192	50	5262	6125	5477	1746	898	1151	368	639	2204
14-10-94	9h00	327,5	1,08	227	468	5457	6840	5828	1540	907	1151	343	611	2346
14-10-94	17h00	335,5	1,07	229	557	5535	6988	5781	1528	934	1116	351	626	2368
15-10-94	11h10	353,5	1,08	233	637	5514	7159	5570	1406	975	1109	356	586	2363

ESSAI CB7

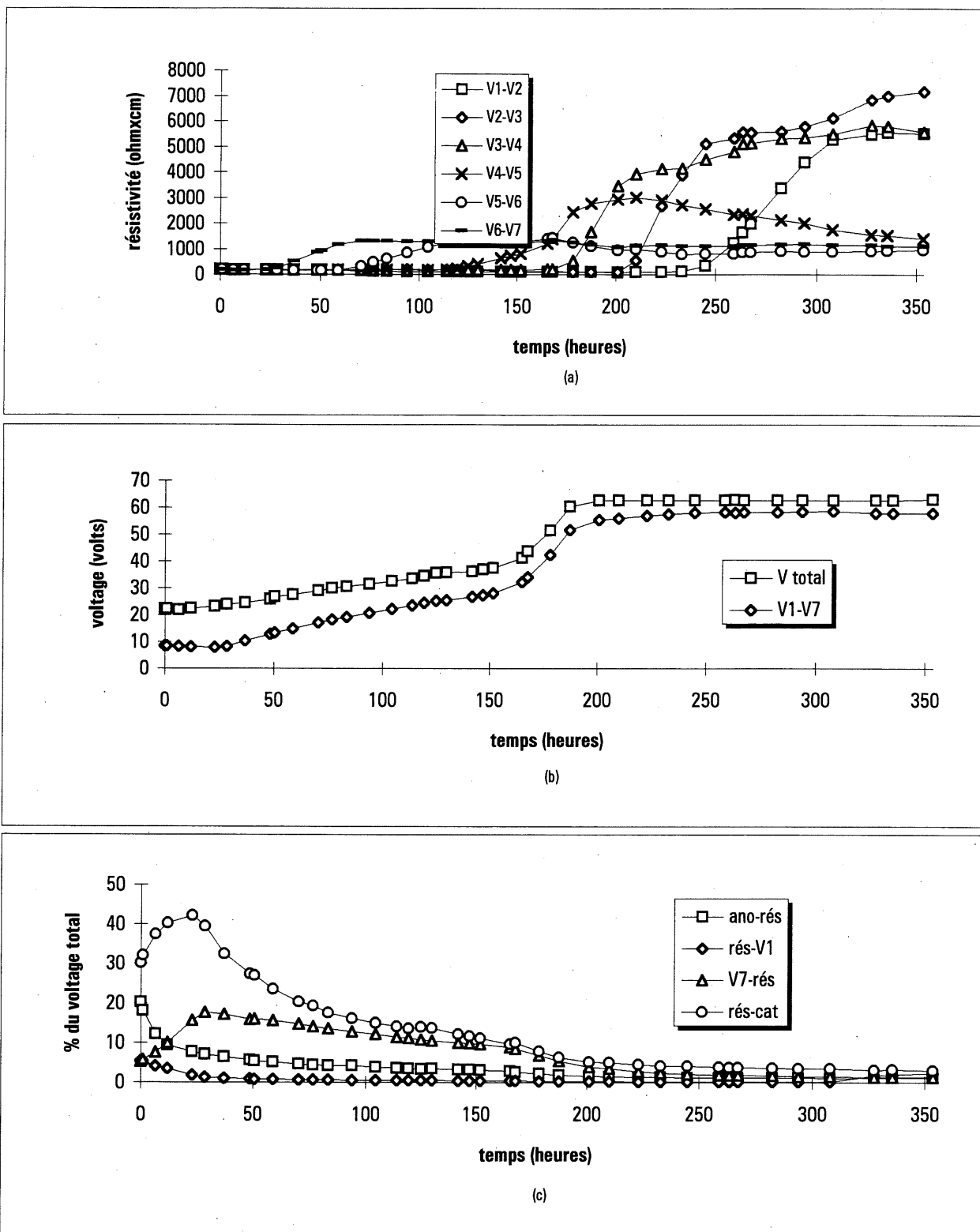


Figure G.6 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB7

section: 2550cm² longueur: 40cm
 Réservoir cathode: recirculation du catholyte (CH₃COOH 0,87M au départ)

Réservoir anode: CH₃COOH 0,87M

TABLEAU G.6 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE				ANODE				Temp. centre °C
						pH		conduct. (umho)		pH		conduct. (umho)		
						bas	haut	bas	haut	bas	haut	bas	haut	
0	0,56	0	0	0	0									-
1	0,55	10980	68	13	13									22,1
6,5	0,55	72360	444	53	66									24,5
12	0,56	133740	821	2	68									26,4
23	0,58	253926	1584	8	76	2,95	2,95	1625	1575		0,97		15000	29,2
28,5	0,60	314019	1979	6	82									30,1
37	0,61	407196	2607	54	136									31,2
48,5	0,65	533052	3488	198	334									32,2
50,5	0,67	554868	3648	78	412		3,2		2300	0,84	0,8	25500	27000	32
59	0,69	647586	4348	132	544									32,6
70,5	0,73	773235	5336	456	1000	3,17	3,19	3075	3100		0,81		35000	33,5
76,75	0,75	841523	5896	261	1261									33,7
83,5	0,76	915152	6516	274	1535									34
94	0,79	1029686	7503	442	1977		3,2		3000	0,52	0,52	33500	33500	35
104,5	0,81	1144409	8523	450	2427									35,9
114	0,84	1248206	9477	0	2427									-
119,5	0,87	1308200	10045	412	2839	3,38	3,38	3900	3950		0,62		41500	36,2
125	0,89	1368194	10630	430	3269									-
130	0,90	1422734	11171	250	3519									36,8
142	0,91	1553630	12482	588	4107		3,37		4300	0,66	0,67	44000	45000	-
147	0,92	1608170	13037	370	4477									39,2
152	0,94	1662710	13600	300	4777									-
165,5	1,04	1809968	15214	0	4777									41,5
168	1,09	1837238	15536	848	5625	3,46	3,46	4600	4800		0,73		47000	-
178,5	1,29	1951772	17052	162	5787									45,8
187,5	1,51	2049944	18576	0	5787									50,5
201	1,57	2187239	20920	-805	-805									53,5
210	1,56	2267591	22318	-500	-1305		3,5		5500	0,61	0,61	56000	56000	42,1
223	1,57	2367977	24063	-600	-1905									46,3
233	1,57	2436017	25246	-525	-2430									44,9
245	1,57	2510753	26546	-580	-3010									-
259	1,57	2589881	27924	-765	-3775	3,6	3,6	6500	6500		0,45		68000	40,3
263,5	1,57	2613533	28337	0	-3775									-
267,5	1,57	2633693	28688	0	-3775									-
282,5	1,57	2705783	29944	-980	-4755									37,4
294	1,57	2757326	30841	0	-4755									-
308	1,57	2816798	31876	-1260	-6015									35,7
327,5	1,57	2895071	33237	-1340	-7355									35,3
335,5	1,57	2926031	33775	-570	-7925									-
353,5	1,58	2995691	34991	-1310	-9235		3,66		7000	0,54	0,54	66000	66000	34,5

ESSAI CB7

TABLEAU G.7 Évolution de la concentration dans les réservoirs

item	dilution	A.A.	temps	conc. Pb	dilution	A.A.	temps	conc. Cu
1 ano haut	25	97	23	166,98	250	74	23	343,86
1 cat bas	250	34	23	518,67	25	228	23	111,26
1 cat haut	250	33	23	500,40	25	231	23	112,76
2 ano bas	25	46	50,5	73,79	250	70	50,5	323,89
2 ano haut	25	42	50,5	66,48	250	67	50,5	308,91
2 cat haut	25	237	50,5	422,80	25	127	50,5	60,84
3 ano haut	25	25	74,5	35,42	250	60	74,5	273,97
3 cat bas	25	180	74,5	318,65	25	147	74,5	70,83
3 cat haut	25	166	74,5	293,07	25	132	74,5	63,34
4 ano bas	10	70	94	47,06	25	464	94	229,07
4 ano haut	10	70	94	47,06	25	454	94	224,08
4 cat haut	25	188	94	333,27	25	133	94	63,84
5 ano haut	10	152	121,5	106,99	25	429	121,5	211,60
5 cat bas	25	138	121,5	241,90	25	96	121,5	45,37
5 cat haut	25	147	121,5	258,35	25	91	121,5	42,87
6 ano bas	25	69	142	115,82	25	401	142	197,62
6 ano haut	25	60	142	99,38	25	382	142	188,14
6 cat haut	25	167	142	294,89	25	172	142	83,31
7 ano haut	25	64	168	106,68	25	360	168	177,16
7 cat bas	25	172	168	304,03	25	136	168	65,34
7 cat haut	25	182	168	322,30	25	145	168	69,83
8 ano bas	25	185	210	327,78	25	354	210	174,16
8 ano haut	25	184	210	325,96	25	344	210	169,17
8 cat haut	25	100	210	172,47	10	123	210	23,54
9 ano haut	-	-	-	-	25	363	259	178,65
9 cat bas	10	52	259	33,90	1	374	259	7,37
9 cat haut	25	17	259	20,80	1	364	259	7,17
10 ano bas	250	34	353	518,67	25	336	353	165,18
10 ano haut	250	34	353	518,67	25	320	353	157,19
10 cat haut	1	224	353	15,96	1	150	353	2,89

note: le bilan de masse n'est pas disponible pour cet essai

Masse de plomb dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 985.6g

Masse de plomb dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 905.8g

Masse de cuivre dans le sol avant traitement (selon caractérisation) = 282.8g

Masse de cuivre dans le sol avant traitement (selon contamination visée) = 277.8g

ESSAI CB7

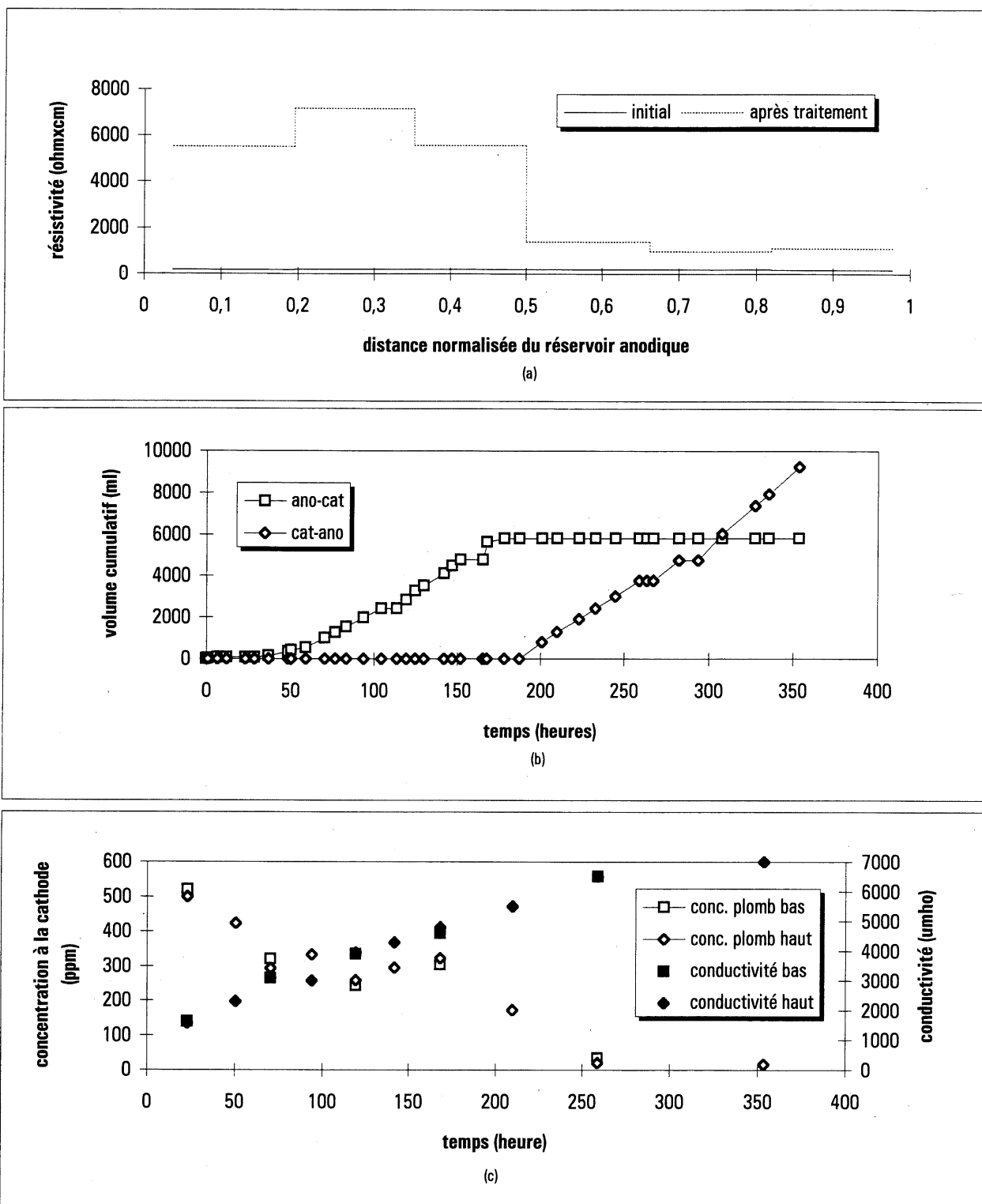


Figure G.7 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique(b), de la concentration en plomb et de la conductivité dans le catholythe (c).

ESSAI CB7

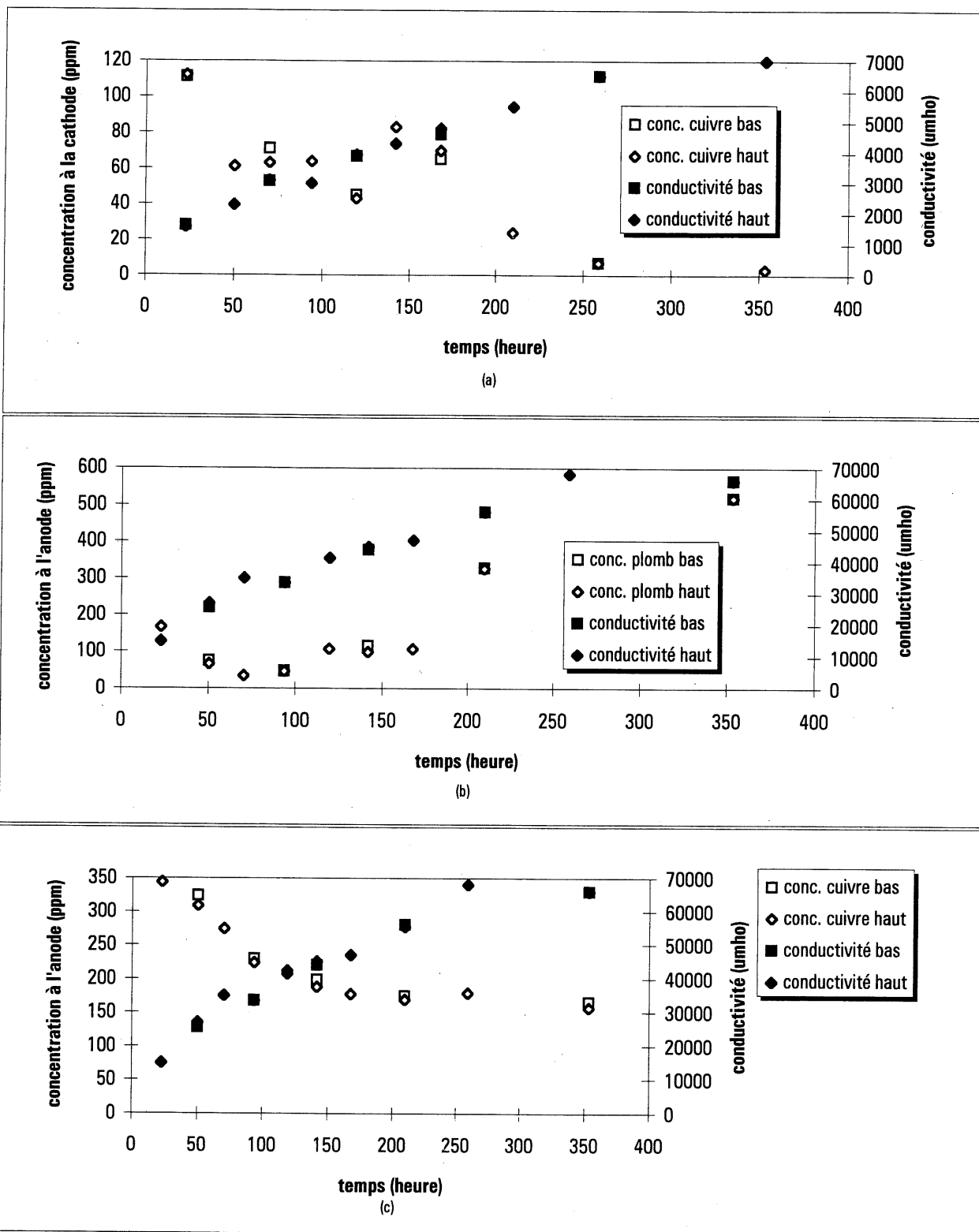


Figure G.8 Variation dans le temps de la concentration en cuivre et de la conductivité dans le catholyte(a), de la concentration en plomb (b) et en cuivre(c) et de la conductivité à l'anode.

Annexe H

TABLEAU H.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT*

zone	w%	pH sol	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	19,26	5,41	13928	35706	51	1157	2735	54
<i>sol cont. 2</i>	19,33	5,36	35174	34118	81	940	1671	66
<i>sol cont. 3</i>	19,36	5,39	63647	30545	91	1506	2024	74
moyenne**	19,32	5,39	37583	33456	83	1201	2143	65

* Selon le bilan de masse la concentration initiale en plomb est de **14028 ppm**; **moyennes pondérées pour % sur sol

TABLEAU H.2 CARACTÉRISATION DU SOL À t = 191h (tranche du haut)

zone	w%	pH sol	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
<i>anode</i>	28,74	<i>n.d.</i>	19288	12225	82	3729	1898	85
<i>centre</i>	21,73	<i>n.d.</i>	19503	21811	76	1454	3060	54
<i>cathode</i>	29,93	<i>n.d.</i>	14841	6389	87	485	237	85
moyenne**	26,80	n.d.	17877	13475	81	1889	1732	77

TABLEAU H.3 CARACTÉRISATION DU SOL À t=554h (tranche du haut)

zone	w%	pH sol	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
<i>anode</i>	40	<i>n.d.</i>	14084	2788	92	127	28	90
<i>centre</i>	24,65	6,5	8400	10707	69	768	508	80
<i>cathode</i>	25,86	6,5	5034	3475	82	694	73	97
moyenne**	30,17	6,50	9173	5657	83	530	203	88

TABLEAU H.4 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
42	55,06	2,64	117	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	612	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
43	59,29	2,18	114	0	100	662	2	100
40	52,01	3,1	367	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	546	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
41	56,18	3,07	138	0	100	569	0	100
32	49,68	3,45	459	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	1889	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
33	56,54	3,29	480	0	100	1169	20	99
30	36,09	4,92	906	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	21279	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
31	31,98	5,32	358	176	84	42513	62059	53
22	21,38	5,96	2139	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	16529	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
23	21,92	6,13	1132	1696	67	41889	74780	61
20	20,1	6,14	1794	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	13284	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
21	21,34	6,24	2731	5502	57	18296	20158	76
12	19,39	6,28	703	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	12416	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
13	20,75	6,2	1224	2289	61	7385	13151	63
10	29,63	6,06	219	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	5095	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
11	24,75	6,17	755	65	98	5600	8049	64
moyenne**	36,01	4,82	852	1216	70	11858	22277	62

ESSAI CB8

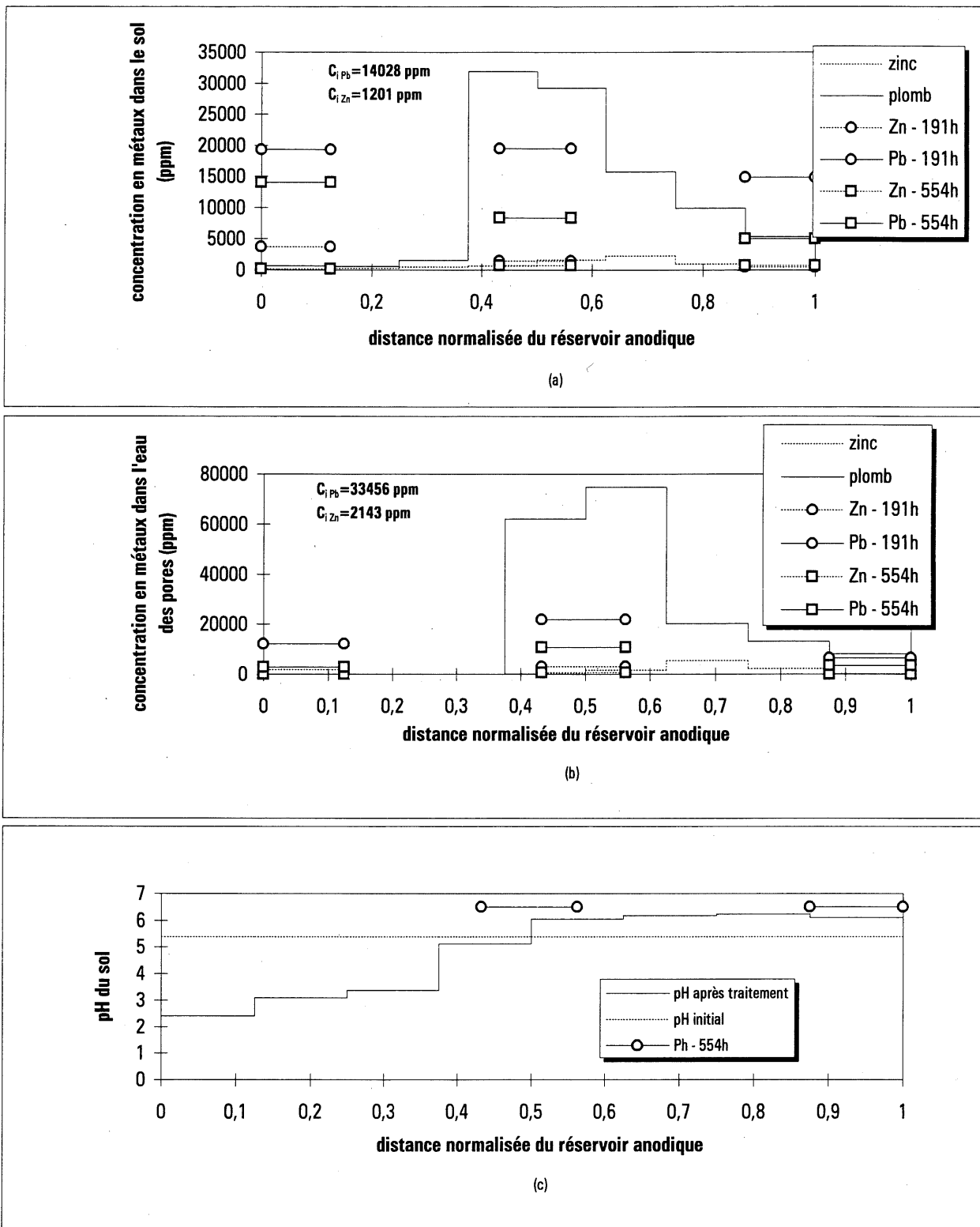


Figure H.1 Distribution du plomb et du zinc après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB8

TABLEAU H.5 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

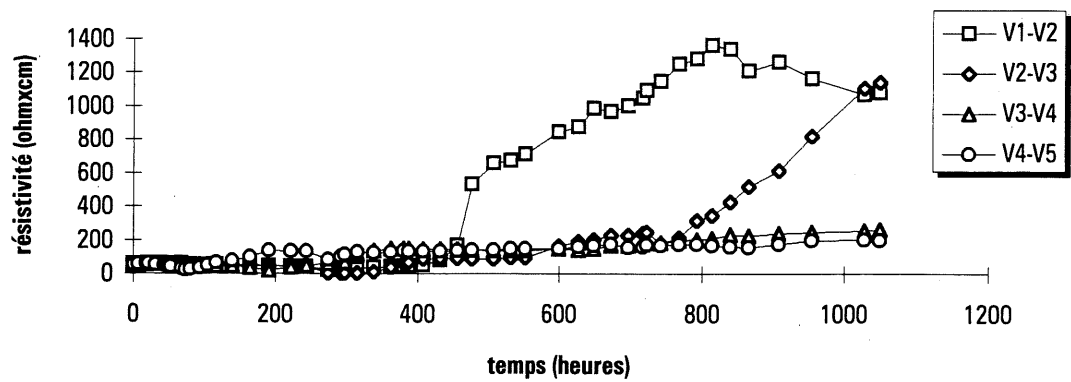
date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
06-12-94	14h00	0	0,92	2,1	0,69	0,65	0,61	0,62	1,73	2,38	9,75
06-12-94	15h00	1	1,17	1,21	0,65	0,63	0,61	0,66	1,62	2,49	9,12
06-12-94	21h30	7,5	1,38	0,72	0,64	0,7	0,64	0,72	0,79	1,87	7,52
07-12-94	9h00	19	1,33	0,67	0,71	0,74	0,7	0,77	0,7	2,28	7,24
07-12-94	11h00	21	1,34	0,62	0,75	0,74	0,72	0,75	5,55	3,34	13,84
07-12-94	21h30	31,5	1,37	0,59	0,74	0,76	0,75	0,68	0,43	1,82	7,18
08-12-94	10h00	44	1,34	0,61	0,73	0,76	0,76	0,61	0,42	1,41	6,7
08-12-94	14h00	48	1,32	0,62	0,72	0,77	0,74	0,55	0,46	1,85	7,06
08-12-94	16h30	49,5	1,3	0,64	0,71	0,74	0,75	0,56	4,3	2,89	11,83
08-12-94	20h00	53	1,32	0,65	0,72	0,74	0,74	0,54	2,71	2,21	9,67
09-12-94	11h00	68	1,3	0,61	0,75	0,71	0,73	0,38	2,39	1,84	8,78
09-12-94	16h00	73	1,35	0,63	0,68	0,7	0,7	0,3	3,86	2,12	10,43
09-12-94	23h00	80	1,37	0,64	0,66	0,69	0,68	0,32	3,12	1,81	9,37
10-12-94	12h30	93,5	1,35	0,73	0,64	0,68	0,66	0,43	2,7	1,66	8,93
10-12-94	23h30	104,5	1,4	0,7	0,64	0,68	0,65	0,65	3,28	1,69	9,8
11-12-94	12h00	117	1,44	0,72	0,69	0,66	0,61	0,83	2,8	1,62	9,46
12-12-94	10h00	139	1,48	0,78	0,58	0,64	0,58	0,98	3,15	1,59	9,96
13-12-94	11h00	164	1,44	0,88	0,57	0,62	0,45	1,25	2,7	1,44	9,46
14-12-94	13h30	190,5	2,01	0,84	0,56	0,61	0,24	1,73	2,72	1,43	10,21
15-12-94	21h00	222	2,63	0,74	0,55	0,61	0,49	1,7	2,44	1,4	10,65
16-12-94	19h00	244	2,99	0,78	0,53	0,56	0,65	1,69	2,23	1,32	10,9
18-01-95	18h00	274	1,58	0,63	0,31	0,05	0,81	1,06	2,16	1,67	8,37
19-01-95	11h30	291,5	1,48	0,67	0,32	0,03	0,83	1,34	2,11	1,43	8,34
19-01-95	17h00	297	1,55	0,65	0,36	0,04	0,9	1,47	2,31	1,45	8,78
20-01-95	10h00	314	6,14	0,77	0,41	0,03	1,33	1,56	3,15	1,78	15,31
20-01-95	16h00	315	2,64	1,04	0,39	0,07	1,5	1,68	3,11	1,75	12,18
21-01-95	15h00	338	2,76	0,81	0,47	0,13	1,76	1,58	2,33	1,49	11,33
22-01-95	15h00	362	2	0,84	0,53	0,47	1,88	1,63	3,31	1,81	12,47
23-01-95	9h30	380,5	2,59	0,92	0,58	0,76	1,89	1,71	2,27	1,49	12,27
23-01-95	16h30	387	2,15	1,07	0,57	0,86	1,88	1,68	2,83	1,61	12,63
24-01-95	13h00	408	2,34	0,94	0,64	1,12	1,88	1,7	2,36	1,48	12,59
25-01-95	12h30	431,5	2,79	0,92	1,01	1,19	1,88	1,71	2,2	1,45	13,29
26-01-95	13h00	456	2,09	0,71	2,14	1,2	1,88	1,78	3,06	1,67	15
27-01-95	9h30	476,5	1,73	0,95	6,75	1,14	1,82	1,81	2,65	1,54	18,52
28-01-95	16h00	507	2,72	3,37	8,52	1,17	1,8	1,83	2,29	1,45	23,53
29-01-95	16h00	531	2,3	3,82	8,5	1,2	1,78	1,87	2,1	1,42	23,07
30-01-95	12h30	551,5	2,76	3,58	8,85	1,2	1,76	1,86	3,5	1,79	25,45
01-02-95	12h30	599,5	1,35	3,54	10,48	2,08	1,89	1,85	2,06	1,39	24,98
02-02-95	16h30	627,5	1,46	3,87	10,88	2,39	1,79	1,99	2,93	1,63	26,94
03-02-95	14h00	649	1,53	3,04	12,32	2,59	1,9	2,09	2,52	1,54	27,65
04-02-95	14h00	673	1,32	2,24	12,11	2,91	2,12	2,23	3,19	1,72	28,09
05-02-95	14h00	697	1,36	3,57	12,5	2,92	2,14	1,99	3,04	1,62	29,14
06-02-95	12h00	717	1,18	3,22	13,44	3,13	2,29	2,08	3,56	0,88	29,98
06-02-95	18h00	723	1,19	2,92	13,88	3,22	2,35	2,18	3	0,76	29,65
07-02-95	13h30	742,5	1,26	3,68	14,31	2,29	2,34	2,13	3,06	1,3	31,56
08-02-95	15h00	768	1,41	3,58	15,75	2,75	2,54	2,23	3,09	1,64	33,8
09-02-95	16h00	793	1,34	3,83	16,15	4,08	2,6	2,21	1,92	1,2	33,5
10-02-95	14h00	815	1,41	4,55	16,75	4,33	2,64	2,1	2,32	1,32	35,6
12-02-95	15h00	840	1,15	3,49	16,44	5,37	2,91	1,99	2,03	1,15	34,6
13-02-95	17h00	866	1,72	2,92	15,25	6,69	2,91	2	2,15	1,07	35
15-02-95	11h00	908	1,53	2,47	15,71	7,81	3,06	2,22	2,06	1,11	36,1
17-02-95	10h00	955	1,5	1,96	14,59	10,51	3,16	2,5	2,38	1,22	37,8
20-02-95	13h30	1028,5	1,67	2,08	13,08	13,8	3,17	2,48	2,05	1,08	39,9
21-02-95	13h00	1050,5	1,82	3,18	13,31	14,33	3,32	2,45	1,99	1,1	41,7

ESSAI CB8

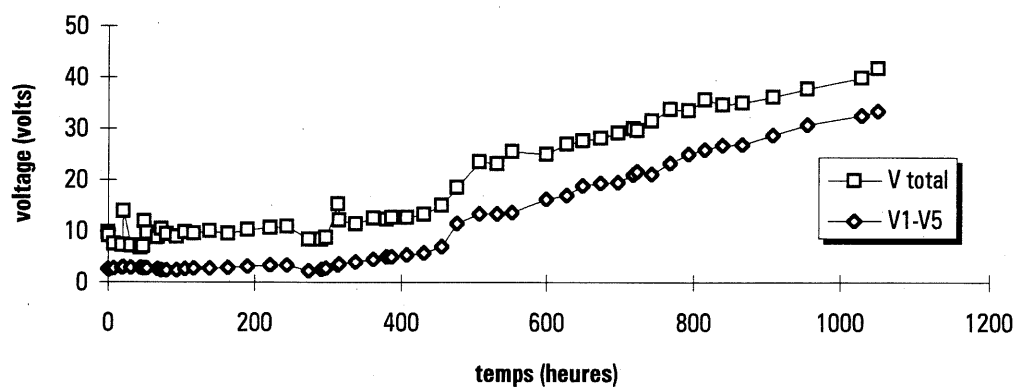
TABEAU H.6 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
06-12-94	14h00	0	249,9	272	209	56	51	48	49	170	755	127
06-12-94	15h00	1	249,9	346	121	52	50	48	53	159	790	118
06-12-94	21h30	7,5	251	406	71	51	55	50	57	77	591	97
07-12-94	9h00	19	251,4	391	66	57	58	55	61	68	719	93
07-12-94	11h00	21	250,5	395	62	60	58	57	60	545	1057	179
07-12-94	21h30	31,5	251,4	403	58	59	60	59	54	42	574	93
08-12-94	10h00	44	252,2	393	60	58	59	59	48	41	443	86
08-12-94	14h00	48	252,2	387	61	57	60	58	43	45	582	91
08-12-94	16h30	49,5	251	383	63	57	58	59	44	421	913	153
08-12-94	20h00	53	251	389	64	58	57	58	43	266	698	125
09-12-94	11h00	68	252,2	381	60	60	55	57	30	233	578	113
09-12-94	16h00	73	251,2	397	62	54	55	55	24	378	669	135
09-12-94	23h00	80	251,1	403	63	53	54	53	25	306	572	121
10-12-94	12h30	93,5	251,7	396	72	51	53	52	34	264	523	115
10-12-94	23h30	104,5	253,1	409	69	51	53	51	51	319	529	126
11-12-94	12h00	117	255,3	417	70	54	51	47	65	270	503	120
12-12-94	10h00	139	259,2	422	75	45	49	44	75	299	486	125
13-12-94	11h00	164	251	424	87	46	49	35	99	265	455	122
14-12-94	13h30	190,5	253,5	586	83	44	47	19	136	264	447	131
15-12-94	21h00	222	253,7	766	73	44	47	38	134	237	438	136
16-12-94	19h00	244	254,5	868	76	42	43	50	132	216	411	139
18-01-95	18h00	274	255	458	62	24	4	63	83	208	519	107
19-01-95	11h30	291,5	255	429	65	25	2	64	105	204	445	106
19-01-95	17h00	297	252,2	454	64	29	3	70	116	225	456	113
20-01-95	10h00	314	251	1807	76	33	2	104	124	309	562	198
20-01-95	16h00	315	258	756	100	30	5	115	130	297	538	153
21-01-95	15h00	338	250,9	813	80	38	10	138	126	228	471	147
22-01-95	15h00	362	250,1	591	84	43	37	148	130	326	574	162
23-01-95	9h30	380,5	251,2	762	91	46	60	148	136	222	470	159
23-01-95	16h30	387	251,2	632	106	46	67	148	133	277	508	163
24-01-95	13h00	408	253,6	682	92	51	87	146	134	229	463	161
25-01-95	12h30	431,5	253,9	812	90	80	92	146	134	213	453	170
26-01-95	13h00	456	255	606	69	169	93	145	139	295	519	191
27-01-95	9h30	476,5	254,4	502	93	534	88	141	142	256	480	236
28-01-95	16h00	507	260	773	323	659	89	136	140	217	442	294
29-01-95	16h00	531	252,6	673	377	677	94	139	148	205	446	296
30-01-95	12h30	551,5	249,6	817	357	713	95	139	149	345	569	331
01-02-95	12h30	599,5	249,1	400	354	846	165	150	148	203	442	325
02-02-95	16h30	627,5	249,1	433	387	878	189	142	159	289	519	351
03-02-95	14h00	649	250,6	451	302	989	204	149	166	247	487	358
04-02-95	14h00	673	251	389	222	970	229	166	177	313	543	363
05-02-95	14h00	697	250,9	400	354	1002	229	168	158	298	512	377
06-02-95	12h00	717	258	338	311	1048	239	175	161	339	270	377
06-02-95	18h00	723	255	345	285	1095	249	182	170	289	236	377
07-02-95	13h30	742,5	250,5	372	366	1149	180	184	169	301	411	409
08-02-95	15h00	768	253,1	412	352	1251	214	198	176	300	514	433
09-02-95	16h00	793	253,1	391	377	1283	318	202	174	187	376	430
10-02-95	14h00	815	247	422	459	1364	346	211	169	231	424	468
12-02-95	15h00	840	247,1	344	352	1338	428	232	161	202	369	454
13-02-95	17h00	866	254	500	286	1207	519	226	157	208	334	447
15-02-95	11h00	908	250,4	451	246	1262	615	241	177	202	351	468
17-02-95	10h00	955	252,2	439	194	1163	821	247	198	232	384	486
20-02-95	13h30	1028,5	246,2	501	210	1068	1105	254	201	205	348	526
21-02-95	13h00	1050,5	248	542	319	1079	1139	264	197	197	352	546

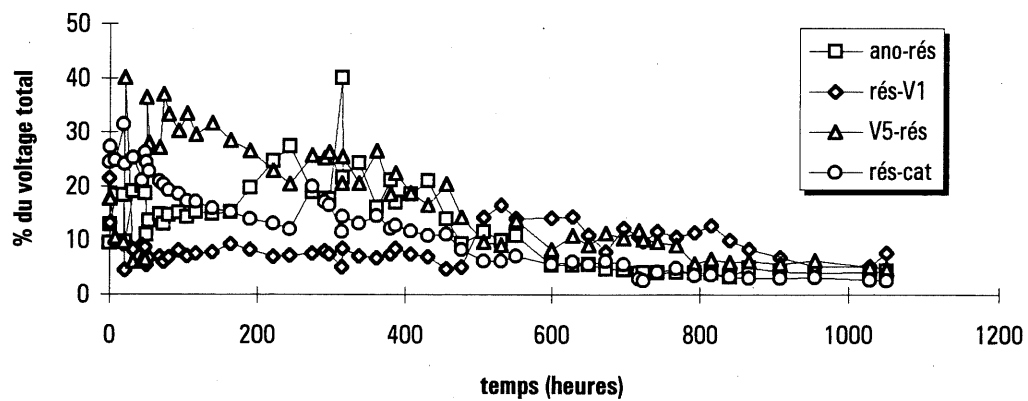
ESSAI CB8



(a)



(b)



(c)

Figure H.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB8

section: 74,1 cm² longueur: 16,5 cm Réservoir anode: eau Réservoir cathode: circulation de HCl jusqu'à t=48 h ; par la suite: circulation de CH₃COOH
Prétraitement: HCl 12,1N équivalent à 2,51 moles d'ions H⁺ / Kg de sol sec

TABLEAU H.7 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE			ANODE	COMMENTAIRES
						pH	cond.(umho)	vol.(ml)	pH	
0	0,59	0	0	0	0	3,2				
1	0,55	900	2	0	0	2,81				recirculation au HCl
7,5	0,46	6760	16	0	0	2,73				forte odeur de chlore à l'anode
19	0,44	17160	37	0	0	2,17				
21	0,84	18967	43	0	0	3,16	14000	1130		
31,5	0,44	28453	70	0	0	1,92				vidange de la cathode
44	0,41	39784	92	0	0	1,62				
48	0,43	43415	99	0	0	2,35				
49,5	0,72	44774	103	0	0	4,09				arrêt de l'essai pour recirculation au CH ₃ COOH
53	0,59	47937	112	0	0	3,9				
68	0,53	61523	147	0	0	4,1	5400	1110		
73	0,63	66054	159	0	0	4,01				vidange de la cathode après lecture des volt.
80	0,57	72383	176	0	0	3,84				début d'électrodéposition
93,5	0,54	84601	207	0	0	3,86				
104,5	0,59	94596	233	0	0	4,07				vidange de la cathode après lecture des volt.
117	0,57	106035	264	0	0	4,06	6000	530		électrodéposition nettement visible
139	0,60	126409	319	0	0	4,04		820		croûte blanche autour du béccher à la cathode
164	0,57	149368	381	0	0	4,07	7400	975		dépôt blanc à la surface du sol
190,5	0,62	173432	447	0	0	4,12				vidange de la cathode après lecture des volt.
222	0,65	202191	530	0	0	4,06				
244	0,66	222315	590	0	0	4,23				
274	0,51	249828	664	0	0	3,57				arrêt de l'essai (entrepôtage en chambre hum.)
291,5	0,51	265893	701	0	0	3,85				dépôts blanc dans le sol mais non en surface
297	0,53	270915	713	0	0	4,12	8600		1,51	électrodéposition +
314	0,93	286313	765	0	0	3,68				
315	0,74	287229	768	0	0	3,7				électrodéposition +; réparations à l'anode
338	0,69	308297	837	0	0	4,05	7200	2580		électrodéposition +; vidange cathode
362	0,76	329940	908	0	0	3,65				forte odeur de chlore à l'anode
380,5	0,74	346634	966	0	0	4,38				
387	0,77	352512	986	0	0	3,8			1,19	
408	0,76	371593	1053	0	0	3,93				
431,5	0,81	393061	1130	0	0	4,08				
456	0,91	415503	1218	0	0	3,74		4300	1,04	vidange anode
476,5	1,12	434300	1306	0	0	3,87				
507	1,43	462540	1471	0	0	4,02				odeur de chlore moins forte à l'anode
531	1,40	484685	1614	0	0	4,17				
551,5	1,54	503216	1739	0	0	3,48	6500	2600	0,82	
599,5	1,51	546304	2041	0	0	4,18				
627,5	1,63	571413	2222	12	12	-				
649	1,68	590751	2368	18	30	3,86		3910		
673	1,70	612420	2536	28	58	3,73				
697	1,77	634102	2708	12	70	3,6				reprise du placage
717	1,82	652423	2859	24	94	3,75				
723	1,80	657963	2905	12	106	3,97			0,84	vidange anode
742,5	1,91	675706	3056	10	116	-	5800	4990		
768	2,05	698822	3265	21	137	3,62				vidange anode
793	2,03	721601	3478	6	143	4,22				
815	2,16	741405	3668	-	143	3,86				
840	2,10	763639	3885	56	199	4,2				
866	2,12	787091	4112	25	224	4				électrodéposition +
908	2,19	825223	4488	41	265	3,99				électrodéposition +
955	2,29	867743	4925	56	321	-		6690		électrodéposition +
1028,5	2,42	933681	5636	-	321	4,22			0,93	électrodéposition +
1050,5	2,53	953252	5858	-	321	-				

ESSAI CB8

TABLEAU H.8 BILAN DE MASSE

PLOMB

cathode

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	mg de Pb	cumulatif
21	1130	5	107	30	34	34
48	915	1	111	6	6	40
68	1110	1	246	15	17	57
93,5	1060	1	128	7	8	65
117	530	1	91	5	3	67
139	820	1	86	5	4	71
164	975	1	261	16	15	87
200	915	1	100	6	5	92
244	960	1	94	4	4	96
solide(244)	517	125	145	1063	525	621
reserv.(244)	99	625	135	4920	465	1086
338	2580	25	35	38	93	1179
456	2110	1	211	13	25	1204
456	2190	1	58	3	6	1210
552	2600	1	70	3	8	1218
628	2060	1	397	19	38	1256
628	1850	1	93	4	8	1264
743	2580	1	101	4	12	1275
743	2410	1	109	5	12	1287
955	2590	1	125	6	15	1302
955	2590	1	130	6	15	1317
955	1510	10	82	36	54	1371
1051	1500	10	80	35	52	1424
1051	1150	10	84	37	42	1466
solide(1051)	565	625	141	4009	2265	3731
surface					250	3981

anode

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	mg de Pb	cumulatif
274	425	50	193	445	228	228
297	20	250	97	1077	26	254
387	20	250	131	1484	36	290
456	20	250	105	1173	28	318
456	500	250	65	694	412	730
552	20	1	373	18	0	730
723	30	1	104	5	0	730
768	20	1	144	7	0	731
1029	80	1	101	4	0	731
1051	900	1	342	16	14	745

3981+745 = 4726 mg de plomb sorti soit 4726 mg/2,177 Kg = **2170 ppm extrait p/r au total initial.**

ESSAI CB8

TABLEAU H.8 (SUITE) BILAN DE MASSE

ZINC

cathode

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	mg de Zn	cumulatif
21	1130	10	211	15	17	17
48	915	10	88	5	4	21
68	1110	10	73	4	4	25
93,5	1060	10	70	3	4	28
117	530	10	81	4	2	30
139	820	10	89	5	4	34
164	975	10	76	4	4	38
200	915	10	61	3	2	40
solide(244)	517	25	207	27	14	54
reserv.(244)	99	625	105	295	29	84
338	2580	10	154	8	20	104
456	2110	2	180	2	5	108
456	2190	1	273	2	4	112
solide(1051)	565	10	500	16	9	121
surface					15	136

anode

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	mg de Zn	cumulatif
274	425	1250	191	1473	626	626
297	20	625	97	435	9	635
387	20	1250	98	655	13	648
456	20	625	190	730	15	662
456	500	250	190	293	146	809

136+809 = 945 mg de zinc sorti soit 945 mg/2,177 Kg = **434 ppm extrait p/r** au total initial.

note importante: le bilan de masse s'arrête à t = 456 heures et la quantité de 434 ppm extrait est un minimum.

ESSAI CB8

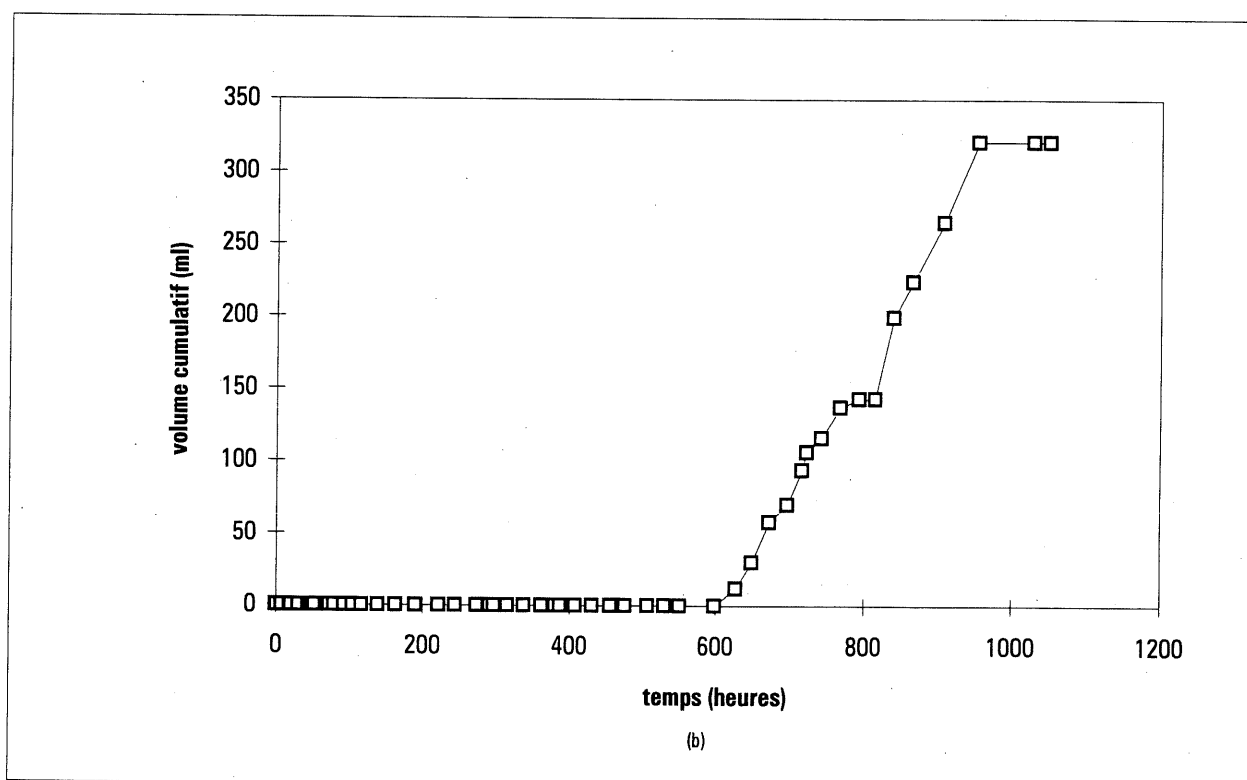
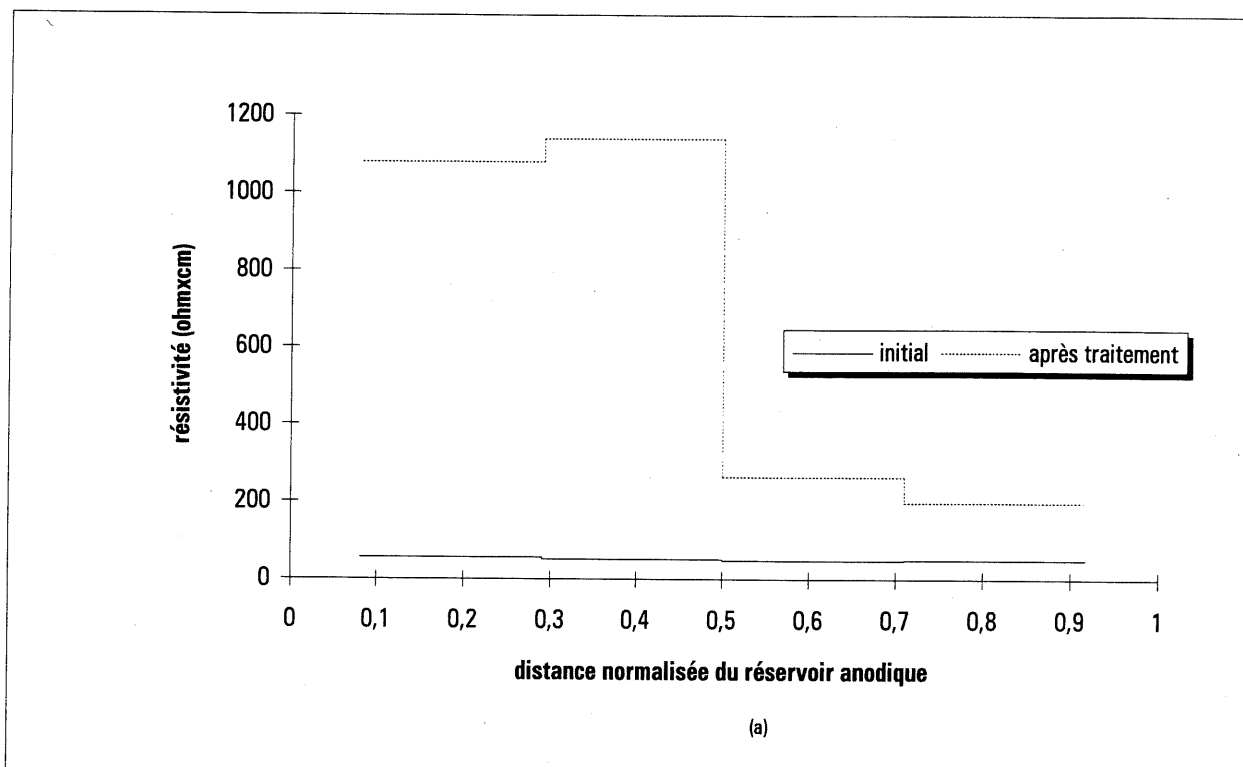


Figure H.3 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du débit électro-osmotique(b).

Annexe I

ESSAI CB12 - sol de Coaticook

Du 8 au 16 juin 1995

TABLEAU I.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	17,1	6,68	1122	4098	38	3632	6618	69
<i>sol cont. 2</i>	17,7	6,68	1139	3852	40	3558	6107	70
<i>sol cont. 3</i>	17,56	6,72	1124	3770	41	3262	9685	48
moyenne*	17,45	6,69	1128	3907	40	3484	7470	63

TABLEAU I.2 CARACTÉRISATION DU SOL À t=100h ET À t=146h (tranche du haut)

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>anode(100)</i>	16,78	7,7	411	203	92	2751	2207	87
<i>centre(100)</i>	15,86	7,29	901	3041	46	7978	3612	93
<i>catho.(100)</i>	15,63	6,67	877	3922	30	3280	9646	54
moyenne*	16,09	7,22	730	2389	48	4669	5155	83
<i>anode(146)</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	398	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	2213	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
<i>centre(146)</i>	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	853	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	4045	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>

TABLEAU I.3 CONCENTRATION EN CALCIUM AVANT TRAITEMENT ET À t=100h.

Ca sol (ppm)	<i>sol cont. 1</i>	<i>sol cont. 2</i>	<i>sol cont. 3</i>	moyenne	<i>anode(100)</i>	<i>centre(100)</i>	<i>catho.(100)</i>	moyenne
	28040	20989	18312	22447	10539	12666	10762	11322

TABLEAU I.4 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
42	15,13	7,08	236	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	1464	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
43	16,79	7,05	209	21	98	1556	791	91
40	14,62	7,47	408	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	3675	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
41	17,00	7,29	467	29	99	4357	214	99
32	14,45	7,26	502	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	3861	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
33	16,38	7,34	479	30	99	3323	199	99
30	13,17	7,09	696	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	4178	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
31	14,62	7,3	595	273	93	4120	1184	96
22	12,52	7,13	899	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	4072	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
23	14,16	7,23	685	475	90	3642	2214	91
20	12,87	7	1202	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	4733	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
21	14,07	7,14	825	1070	82	3408	3236	87
12	13,03	6,88	1295	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	4469	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
13	13,98	7,17	971	2432	65	4582	3983	88
10	14,36	6,8	637	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>	1752	<i>n.d.</i>	<i>n.d.</i>
11	15,22	6,93	857	2995	47	1998	4652	65
moyenne*	14,52	7,14	685	916	79	3449	2059	91

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB12

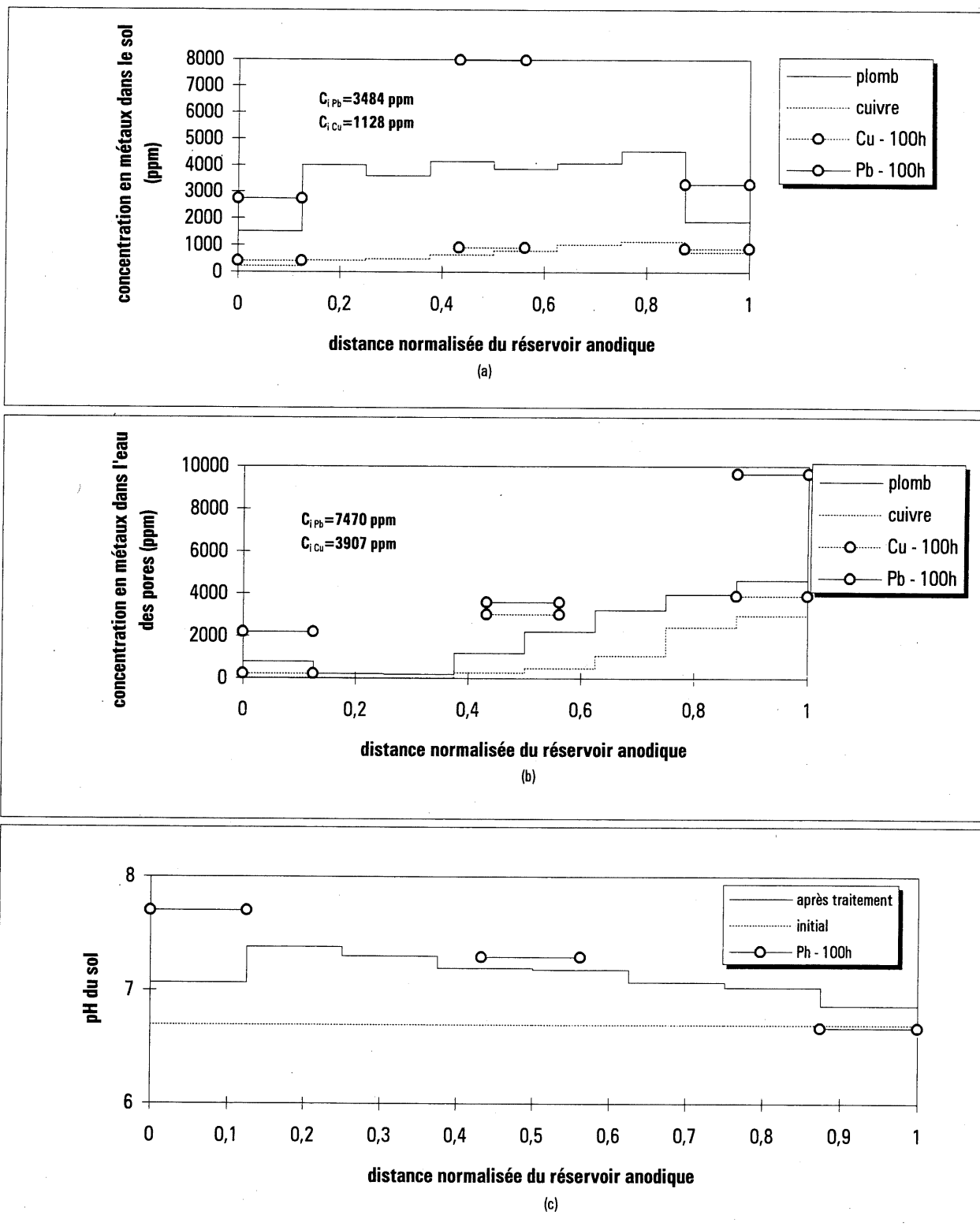


Figure I.1 Distribution du plomb et du cuivre après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB12

TABLEAU I.5 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
08-06-95	12h00	0	1,35	1,16	2,54	2,05	2,14	2,23	7,09	3,52	22,05
08-06-95	14h00	2	1,4	1,18	2,47	2,12	2,18	2,3	3,67	2,32	17,74
08-06-95	18h00	6	1,43	0,78	2,34	2,15	2,19	2,64	3,63	2,1	17,37
09-06-95	1h00	13	1,09	1,1	2,08	2,1	2,13	3,46	2,82	1,75	16,59
09-06-95	12h00	24	1,15	1,17	1,79	1,94	2,86	3,49	5,21	2,45	20,14
09-06-95	14h00	26	1,21	1,09	1,79	2,05	2,75	3,57	3,54	1,92	17,98
09-06-95	20h00	32	1,18	1,17	1,71	2,26	2,56	3,46	3,57	1,9	17,87
10-06-95	00h30	36,5	1,29	1,13	1,77	2,34	2,44	3,23	3,29	1,81	17,36
10-06-95	11h00	47	1,4	1,1	2,03	2,19	2,28	2,77	3,18	1,81	16,8
10-06-95	23h30	59,5	1,44	1,26	2,15	2,09	2,21	2,58	2,73	1,7	16,2
11-06-95	10h00	70	1,11	1,18	2,15	2,01	2,19	2,48	2,63	1,68	15,49
11-06-95	24h00	84	1,08	1,36	2,22	1,94	2,12	2,4	2,41	1,55	15,14
12-06-95	15h30	99,5	1,18	2,16	2,22	1,77	1,97	2,22	2,43	1,63	15,61
13-06-95	1h30	109,5	1,05	1,41	2,32	1,97	2,1	2,37	2,24	1,59	15,07
13-06-95	16h30	124,5	1,1	1,37	2,37	1,89	1,97	2,25	2,3	1,56	14,87
13-06-95	18h00	125	13,55	37	2,06	1,59	1,71	1,9	2,1	1,59	61,7
13-06-95	19h00	126	12,39	37,2	2,39	1,77	1,85	2,07	2,16	1,52	61,7
14-06-95	9h00	140	5,32	49,2	2,69	0,76	0,75	0,8	1,19	1,41	62,5
14-06-95	15h00	146	4,37	52,6	2,44	0,36	0,37	0,27	0,76	1,25	62,8
14-06-95	16h00	147	1,12	9,11	6,07	2,12	2,16	2,48	2,6	1,69	27,21
14-06-95	17h00	148	1,1	5,71	5,43	1,98	2,05	2,36	2,49	1,67	22,81
14-06-95	21h00	152	1,06	3	5,3	2,11	1,94	2,2	2,21	1,51	19,39
15-06-95	10h00	165	1,19	2,31	4,29	3,01	2,38	2,12	2,01	1,49	18,85
15-06-95	13h30	168,5	1,18	2,25	4,26	3,04	2,71	2,09	2,58	1,65	19,85
15-06-95	22h00	177	1,18	2,17	4,13	3,05	2,95	2,68	2,32	1,38	19,92
16-06-95	12h00	191	1,2	2,33	3,93	3,02	2,91	3,06	4,81	2,3	23,6

ESSAI CB12

TABLEAU I.6 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
08-06-95	12h00	0	250	399	116	204	162	169	178	698	1116	286
08-06-95	14h00	2	256	404	115	194	163	168	179	353	719	225
08-06-95	18h00	6	252	419	77	187	168	171	209	354	661	224
09-06-95	1h00	13	249	323	110	168	166	169	277	279	557	216
09-06-95	12h00	24	248	343	117	145	154	227	280	517	783	264
09-06-95	14h00	26	249	359	109	145	162	218	286	350	611	234
09-06-95	20h00	32	249	350	117	138	179	203	277	353	605	233
10-06-95	00h30	36,5	249	383	113	143	185	193	259	325	576	226
10-06-95	11h00	47	250	414	110	163	173	180	221	313	574	218
10-06-95	23h30	59,5	250	426	125	173	165	174	206	269	539	210
11-06-95	10h00	70	251	327	117	172	158	172	197	258	531	200
11-06-95	24h00	84	256	312	132	174	149	163	187	232	480	192
12-06-95	15h30	99,5	249	350	216	179	140	156	178	240	519	203
13-06-95	1h30	109,5	250	310	140	187	155	166	189	220	504	196
13-06-95	16h30	124,5	250	325	136	191	149	155	179	226	495	193
13-06-95	18h00	125	206	4860	4472	201	152	164	184	251	612	972
13-06-95	19h00	126	227,5	4024	4072	211	153	160	181	234	530	880
14-06-95	9h00	140	93	4226	13173	582	161	159	171	315	1202	2181
14-06-95	15h00	146	39	8278	33583	1258	182	187	138	479	2541	5225
14-06-95	16h00	147	252	328	900	484	166	169	196	254	532	350
14-06-95	17h00	148	251	324	566	435	155	161	187	244	528	295
14-06-95	21h00	152	251	312	298	425	166	152	175	217	477	251
15-06-95	10h00	165	252	349	228	342	235	186	168	196	469	243
15-06-95	13h30	168,5	251	347	223	341	239	213	166	253	521	257
15-06-95	22h00	177	252	346	214	330	239	231	212	226	434	257
16-06-95	12h00	191	251	353	231	315	237	229	243	471	727	305

ESSAI CB12

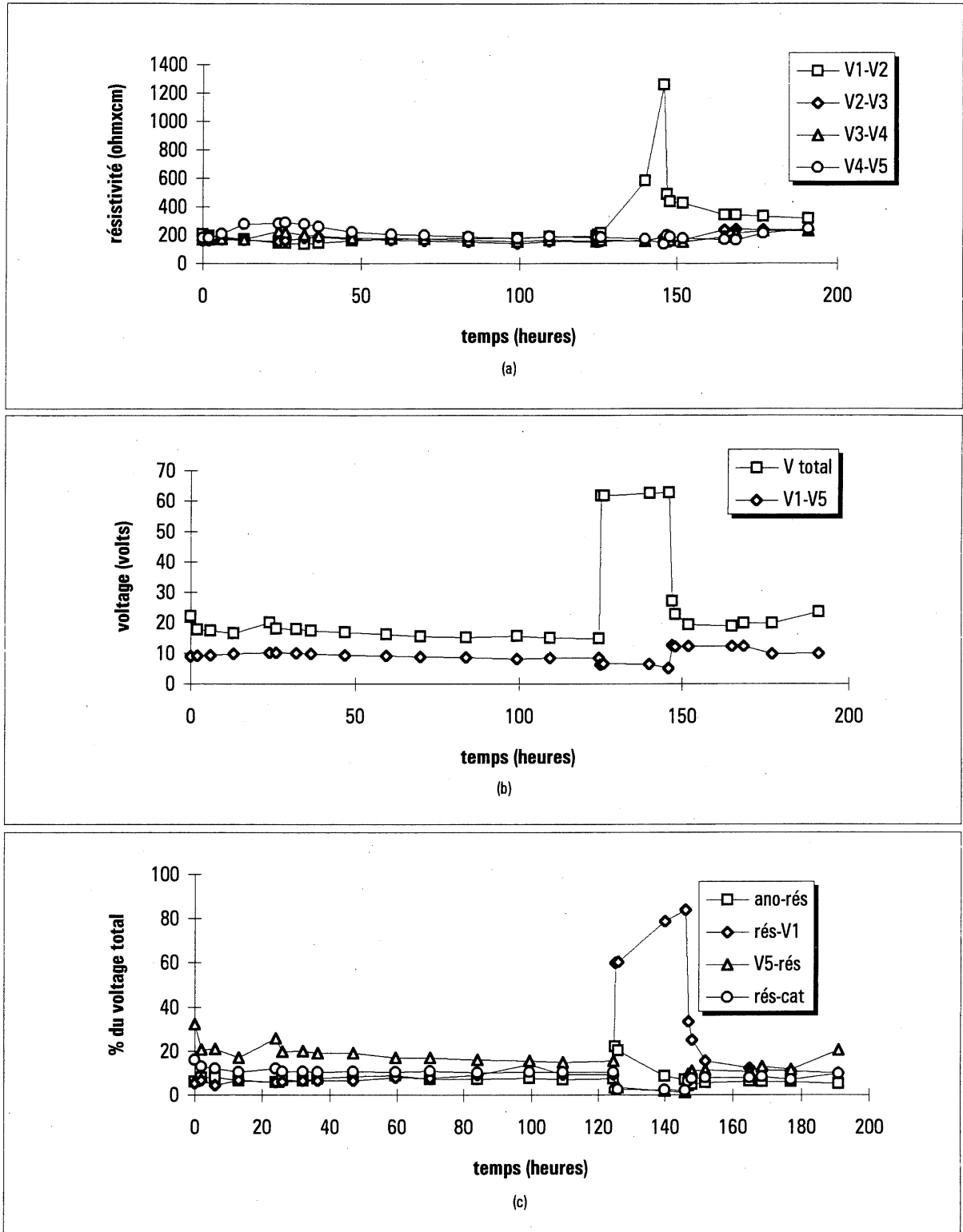


Figure I.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB12**section:** 65,3 cm²**longueur:** 16,4 cmRéservoir anode: contrôle du pH avec du NaOAc 1M; circulation rapide de H₂O; contrôle du pH avec du CaOAc 0,5MRéservoir cathode: circulation de CH₃COOHPrétraitement: CH₃COOH 0,87M équivalant à 0,16 mole d'ions H⁺ / Kg de sol sec

TABLEAU I.7 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE			ANODE		COMMENTAIRES
						pH	cond.(umho)	vol.(ml)	pH	cond.(umho)	
0	0	0	0			3,04			4,94		surageant bleu en début d'essai
2	1,08	16394	91			3,62			4,85		
6	1,05	20052	108			3,72			4,81		plaquage apparent; le surageant a disparu
13	1,01	26365	138			4,18			4,62		
24	1,22	36205	188			3,4			4,39		
26	1,09	37994	198			3,67			4,5		
32	1,08	43373	225			3,03			4,49		
36,5	1,05	47407	244			3,16			4,43		on voit des petites bulles sortir du sol à l'interfa-
47	1,02	56838	289			3,03			4,27		ce sol-réservoir anodique
59,5	0,98	68088	341			3,25			4,32		
70	0,94	77557	382			3,25			4,85		
84	0,92	90333	437			3,43			4,59		
99,5	0,95	104423	497			3,35			4,03		
109,5	0,91	113405	535			3,52			4,82		
124,5	0,90	126905	591			3,43			4,64		
125	3,74	127315	596			3,53			4,94		circulation rapide d'eau du robinet à l'anode
126	3,74	128095	609			3,54			4,9		
140	3,79	136172	748			3,4			3,7		
146	3,81	137597	773								contrôle au CaOAc 0,5M à l'anode
147	1,65	138121	780			3,55			5,48		
148	1,38	139027	786			3,59			5,09		
152	1,18	142641	807			3,84			5,56		
165	1,14	154411	870			4,12			4,35		
168,5	1,20	157580	887			3,94			4,39		
177	1,21	165276	929			4,21			4,47		
191	1,43	177952	1006			3,46			4,2		

ESSAI CB12

TABLEAU I.8 BILAN DE MASSE

CUIVRE - résiduel sol: 39% extrait ; bilan: 48% extrait**cathode**

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
glob.(146)	2150	1	590	9	1	1
glob.(fin)	1950	1	365	6	1	1
dépôt	500	625	194	1851	42	44

anode

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
glob.(100)	1850	25	120	45	4	4
glob.(fin)	400	1	62	1	0	4

PLOMB - résiduel sol: 1% extrait ; bilan: 23% extrait**cathode**

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
glob.(146)	2150	1	290	16	1	1
glob.(fin)	1950	1	198	11	0	1
dépôt	500	625	90	2874	21	22

anode

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
glob.(100)	1850	25	27	22	1	1
glob.(fin)	400	1	274	15	0	1

Annexe J

ESSAI CB9 - sol numéro 5

Du 17 au 24 février 1995

TABLEAU J.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	19,32	2,68	7903	20765	49	1847	1205	87
<i>sol cont. 2</i>	18,81	2,44	8437	18298	59	1877	1327	87
<i>sol cont. 3</i>	18,8	2,54	9115	19120	61	1829	1455	85
moyenne*	18,98	2,55	8485	19394	57	1851	1329	86
zone	w%	pH sol	Cu sol (ppm)	Cu eau (ppm)	Cu sur sol (%)	Zn sol (ppm)	Zn eau (ppm)	Zn sur sol (%)
moyenne*	18,98	2,55	387	2011	2	160	427	49

TABLEAU J.2 CARACTÉRISATION DU SOL À t=69,5h (tranche du haut)

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>anode</i>	20,55	2,16	5676	10773	61	1700	661	92
<i>centre</i>	22,84	3,68	3046	419	97	574	230	91
<i>cathode</i>	21,72	3,72	3601	427	97	1035	115	98
moyenne*	21,70	3,19	4108	3873	80	1103	335	94

TABLEAU J.3 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

réservoir	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir
anode	43	41	33	31	23	21	13	11	cathode

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
42	20,26	3,53	3082	n.d.	n.d.	404	n.d.	n.d.
43	19,50	3,53	3173	28	100	348	7	100
40	21,71	3,69	3505	n.d.	n.d.	454	n.d.	n.d.
41	19,68	3,67	3599	112	99	371	6	100
32	20,96	3,71	3249	n.d.	n.d.	526	n.d.	n.d.
33	19,67	3,68	3779	147	99	527	5	100
30	20,79	3,72	3984	n.d.	n.d.	623	n.d.	n.d.
31	19,35	3,77	3269	257	98	637	9	100
22	19,56	3,74	4281	n.d.	n.d.	766	n.d.	n.d.
23	19,37	3,94	4087	1183	94	957	21	100
20	18,88	3,91	3412	n.d.	n.d.	915	n.d.	n.d.
21	19,19	3,96	4142	1272	94	729	26	99
12	18,81	3,94	3785	n.d.	n.d.	906	n.d.	n.d.
13	19,13	3,97	3579	947	95	806	26	99
10	18,75	3,9	3912	n.d.	n.d.	1465	n.d.	n.d.
11	18,76	3,97	4152	932	96	1202	25	100
moyenne*	19,65	3,79	3687	610	97	727	16	100

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB9

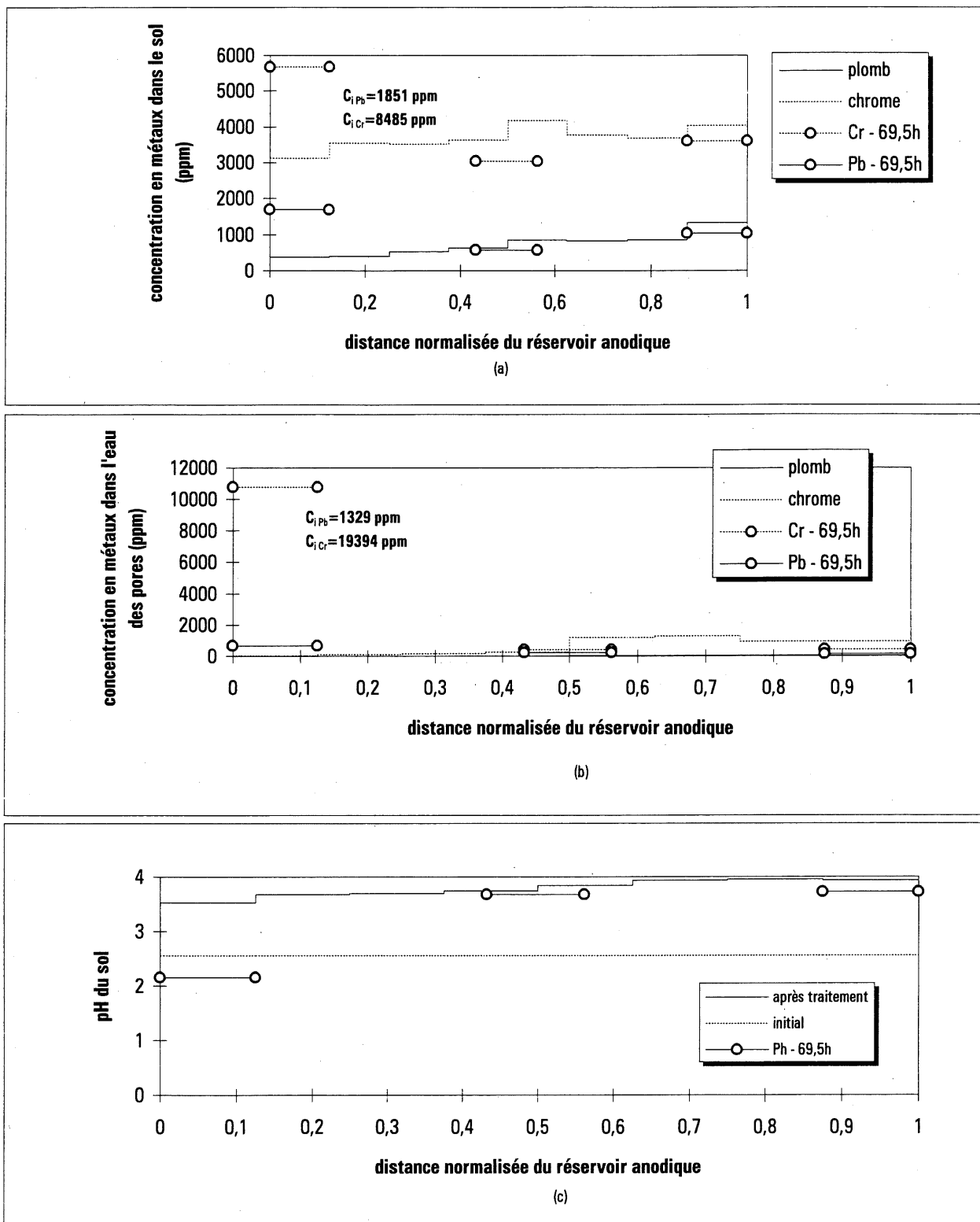


Figure J.1 Distribution du plomb et du chrome après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB9

TABLEAU J.4 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
17-02-95	19h00	1,5	1,26	0,87	0,82	0,59	0,68	0,7	1,04	1,77	7,73
18-02-95	11h30	18	1,6	0,44	0,63	0,53	0,49	15,19	7,35	1,7	28,08
18-02-95	23h30	30	1,37	0,43	0,5	0,47	4,88	32,03	6,15	1,56	47,07
19-02-95	12h30	43	1,32	0,33	0,41	3,3	25,22	25,74	5,01	1,51	62,9
19-02-95	21h00	51,5	1,31	0,29	0,17	11,4	21,13	21,42	5,53	1,58	63,1
20-02-95	10h30	65	1,25	0,31	2,56	14,82	17,11	17,8	7,04	1,86	63,1
20-02-95	15h00	69,5	1,25	0,28	5,37	14,62	16,44	17,84	5,39	1,54	63
21-02-95	12h00	90,5	1,25	1,87	14,76	14,06	15,12	11,54	2,86	1,21	63,1
21-02-95	17h30	96	1,22	2,45	15,13	14,52	13,09	9,2	4,37	1,46	63
22-02-95	10h30	113	1,34	3,6	15,5	13,47	11,29	11,74	4,29	1,43	63
23-02-95	8h30	135	1,45	4,46	13,83	12,86	11,88	13,4	3,26	1,43	63
23-02-95	22h00	148,5	1,15	4,35	12,5	11,78	11,11	13,71	6,24	1,75	63
24-02-95	11h30	162	1,43	3,75	12,3	11,12	11,85	14,17	6,13	1,74	63

ESSAI CB9

TABEAU J.5 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
17-02-95	19h00	1,5	251,8	370	86	65	46	53	55	102	557	100
18-02-95	11h30	18	245,5	481	45	52	43	39	1233	736	549	371
18-02-95	23h30	30	237	427	45	42	39	406	2693	638	522	644
19-02-95	12h30	43	205,5	475	40	40	317	2419	2496	600	583	993
19-02-95	21h00	51,5	146,2	662	49	23	1537	2849	2920	930	857	1401
20-02-95	10h30	65	95,8	964	81	537	3049	3520	3703	1808	1539	2137
20-02-95	15h00	69,5	91,7	1007	76	1178	3142	3534	3877	1446	1332	2229
21-02-95	12h00	90,5	70,8	1304	658	4192	3914	4209	3248	994	1355	2892
21-02-95	17h30	96	64,2	1404	950	4739	4458	4019	2856	1674	1803	3184
22-02-95	10h30	113	63,4	1562	1414	4916	4188	3510	3691	1665	1788	3225
23-02-95	8h30	135	60,1	1782	1848	4628	4217	3896	4444	1334	1887	3402
23-02-95	22h00	148,5	55,7	1525	1945	4513	4168	3931	4906	2756	2491	3670
24-02-95	11h30	162	53,6	1971	1742	4615	4089	4358	5269	2813	2574	3814

ESSAI CB9

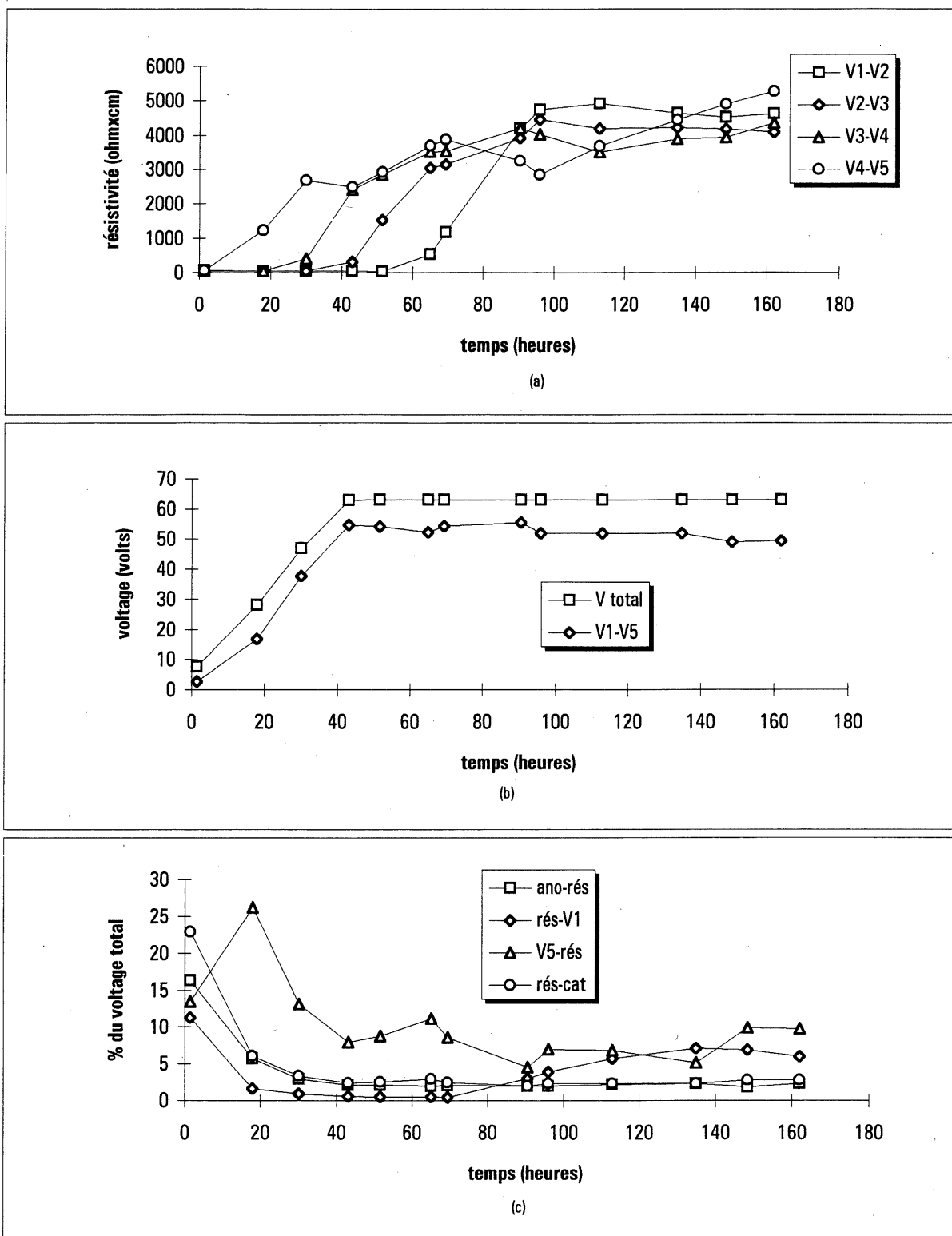


Figure J.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB9**section:** 79,1 cm²**longueur:** 16,4 cm

Réservoir anode: eau

Réservoir cathode: circulation de CH₃COOHPrétraitement: HCl 8N équivalent à 0,87 mole d'ions H⁺ / Kg de sol sec

TABLEAU J.6 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE			ANODE		COMMENTAIRES
						pH	cond.(umho)	vol.(ml)	pH	cond.(umho)	
1,5	0,47	1360	3	0	0	2,5					liquide très opaque à la cathode + anode forte odeur de chlore à l'anode sol plus pâle dans zone cathode (figure)
18	1,70	16113	80	-50	-50	3,59	4000		1,06	55000	
30	2,85	26535	189	-140	-190	3,53					
43	3,81	36889	347	-135	-325	3,55					
51,5	3,82	42270	441	-85	-410	3,4	2300		0,77	60000	échantillonnage du sol
65	3,82	48151	544	-190	-600	3,07					
69,5	3,82	49669	571	-50	-650		1900		0,95	50000	
90,5	3,82	55812	678	-175	-825						
96	3,82	57148	702	-75	-900	3,21					le réservoir cathode est au tiers (gradient hyd.)
113	3,82	61053	770	-225	-1125	3,23	1600		1,62	8000	
135	3,82	65944	856	-50	-1175						
148,5	3,82	68757	905	-185	-1360						
162	3,82	71413	952	-215	-1575		800		1,9	2900	tout au long de l'essai le fluide cathodique était rouge vin. Ce fluide devenait plus pâle alors que l'essai progressait.

ESSAI CB9

TABLEAU J.7 BILAN DE MASSE

CHROME - résiduel sol: 57% extrait ; bilan: 56% extrait

cathode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
18	100	625	149	2161	1	1
51,5	100	625	118	1677	1	2
69,5	60	625	65	850	0	2
113	86	250	102	571	0	2
global (113)	1880	625	80	1085	10	13
global (113)	1110	50	314	379	2	15
162	100	125	126	302	0	15
global (162)	1340	125	106	243	2	16
dépôt cat.	1000	25	91	40	0	17

anode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
18	105	1250	265	7943	4	4
51,5	100	1250	360	10907	5	10
69,5	92	1250	258	7724	4	13
113	92	250	111	627	0	13
global (113)	1125	625	292	4393	25	38
162	100	25	228	121	0	38
global (162)	810	25	257	138	1	39

PLOMB - résiduel sol: 61% extrait ; bilan: 63% extrait

cathode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
18	100	25	260	410	1	1
51,5	100	250	40	531	1	2
69,5	60	25	148	228	0	2
113	86	10	240	151	0	3
global (113)	1880	25	66	95	4	7
global (113)	1110	25	110	167	4	11
162	100	1	292	15	0	11
global (162)	1340	5	140	35	1	12
dépôt cat.	1000	625	52	1423	33	45

anode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
18	105	250	78	1147	3	3
51,5	100	250	123	1877	4	7
69,5	92	250	96	1439	3	10
113	92	25	10	4	0	10
global (113)	1125	25	206	322	8	18
162	100	1	135	7	0	18
global (162)	810	1	38	2	0	18

ESSAI CB9

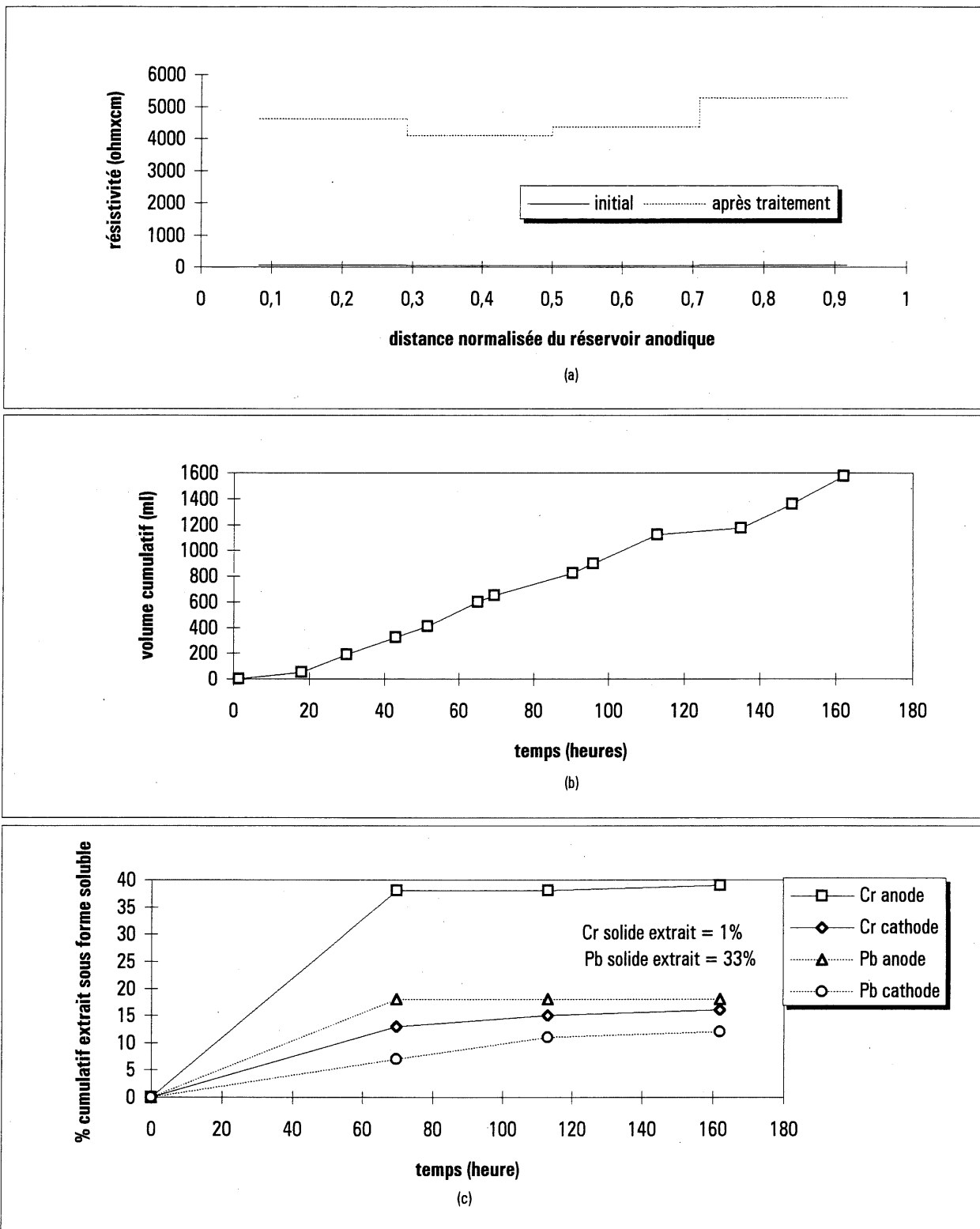


Figure J.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique cathode vers anode(b) et de l'extraction des métaux (c).

Annexe K

ESSAI CB10 - sol numéro 5

Du 7 au 20 mars 1995

TABLEAU K.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	20,23	3,65	7595	20818	45	1940	1745	82
<i>sol cont. 2</i>	20,57	3,61	7869	13722	64	1865	1065	88
<i>sol cont. 3</i>	20,17	3,64	7137	14867	58	1757	1348	85
moyenne*	20,32	3,63	7534	16469	56	1811	1386	85

TABLEAU K.2 CARACTÉRISATION DU SOL À t=55h (tranche du haut)

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>anode</i>	19,3	3,56	7595	21962	44	1915	1999	80
<i>centre</i>	20,14	3,6	8327	21733	48	1896	1688	82
<i>cathode</i>	22,86	3,9	3441	3272	78	1892	71	99
moyenne*	20,77	3,69	6454	15656	52	1901	1253	87

TABLEAU K.3 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

réservoir	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir
anode	43	41	33	31	23	21	13	11	cathode

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
42	21,89	4,32	3366	n.d.	n.d.	1301	n.d.	n.d.
43	22,02	4,51	1934	19	100	1570	13	100
40	21,68	4,06	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
41	21,45	4,07	n.d.	14	n.d.	n.d.	8	n.d.
32	22,05	4,07	3031	n.d.	n.d.	1143	n.d.	n.d.
33	21,65	4,33	3460	16	100	899	8	100
30	22,81	4,28	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
31	21,86	4,15	n.d.	26	n.d.	n.d.	12	n.d.
22	23,07	4,27	3754	n.d.	n.d.	1646	n.d.	n.d.
23	21,41	4,21	4000	36	100	1708	15	100
20	22,84	4,32	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
21	20,66	4,43	n.d.	52	n.d.	n.d.	15	n.d.
12	21,67	4,17	4769	n.d.	n.d.	1536	n.d.	n.d.
13	19,83	4,38	3694	42	100	1476	18	100
10	20,11	4,24	3814	n.d.	n.d.	1087	n.d.	n.d.
11	19,12	4,32	3918	43	100	1254	27	100
moyenne*	21,51	4,26	3574	31	100	1362	15	100

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB10

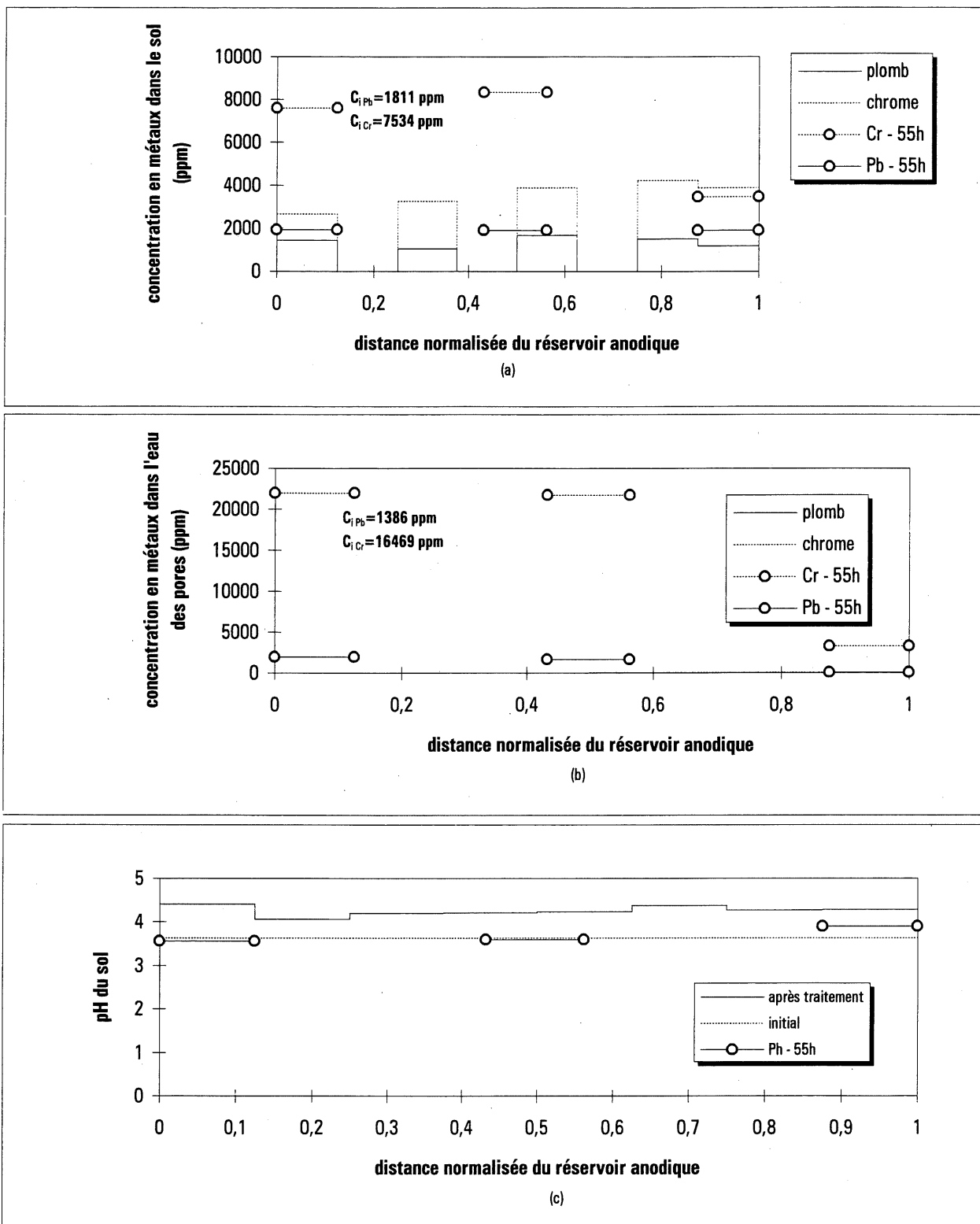


Figure K.1 Distribution du plomb et du chrome après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB10

TABEAU K.4 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
07-03-95	14h00	0	1,37	0,32	0,42	0,26	0,5	0,77	0,73	1,74	6,06
07-03-95	17h00	3	1,2	0,27	0	0,46	0,42	0,67	1,04	1,5	5,59
07-03-95	22h30	8,5	1,22	0,18	-0,04	0,68	0,4	0,73	1,39	1,48	6
08-03-95	11h00	21	1,15	-0,08	0,27	0,5	0,54	0,96	7,17	1,6	12,32
08-03-95	15h00	25	1,11	-0,09	0,27	0,46	0,63	1,26	8,54	1,58	13,95
08-03-95	23h00	33	1,32	-0,38	0,32	0,43	0,75	6,12	8,86	1,45	18,93
09-03-95	11h00	45	1,19	-0,36	0,29	0,5	0,86	12,55	9,97	1,65	26,56
09-03-95	14h30	48,5	1,19	-0,34	0,29	0,51	0,89	14,51	10,33	1,87	29,31
09-03-95	21h00	55	1,15	-0,35	0,27	0,48	1,13	19,14	11,13	1,71	35
10-03-95	12h00	70	1,07	-0,33	0,23	0,43	11,19	34,4	10,05	1,3	58,5
10-03-95	18h30	76,5	1,05	-0,37	0,19	0,38	17,13	33,2	9,76	1,43	63
11-03-95	13h00	95	0,96	-0,27	0,19	2,08	23,92	30,95	2,71	2,23	63
12-03-95	22h00	128	1	0	0,1	11,74	18,46	22,08	7,28	2,3	63
13-03-95	11h30	141,5	1,23	-0,3	0,24	14,82	17,38	20,34	6,75	2,35	63
13-03-95	18h30	148,5	1,52	-0,38	0,82	16,26	16,98	20,11	5,51	1,98	63
14-03-95	14h00	168	1,93	0,06	2,66	16,82	15,25	17,99	5,87	2,28	63
15-03-95	11h00	189	2,76	0,07	8,78	14,69	13,34	15,83	5,46	1,92	62,9
16-03-95	15h00	217	11,23	0,26	8,25	11,58	11,22	13,63	4,64	1,56	62,9
17-03-95	14h00	240	1,73	1,02	11,93	13,36	12,76	15,51	5,03	1,46	62,9
19-03-95	23h30	297,5	1,94	1,2	10,3	14,32	13,4	15,86	4,4	1,92	62,9
20-03-95	14h00	312	2,2	1,35	10,56	12,97	12,7	14,06	6,7	1,98	62,9

ESSAI CB10

TABEAU K.5 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
07-03-95	14h00	0	250,5	404	32	34	20	39	61	72	551	79
07-03-95	17h00	3	257,1	345	26	0	35	32	52	100	463	71
07-03-95	22h30	8,5	257,6	350	17	-3	52	31	56	133	456	76
08-03-95	11h00	21	254,1	334	-8	21	39	42	75	694	499	157
08-03-95	15h00	25	252,9	324	-9	21	36	49	99	831	495	179
08-03-95	23h00	33	251,9	387	-38	26	34	59	484	865	456	244
09-03-95	11h00	45	251,9	349	-36	23	39	67	993	974	519	342
09-03-95	14h30	48,5	253,4	347	-33	23	40	69	1141	1003	585	375
09-03-95	21h00	55	249,4	341	-35	22	38	89	1530	1098	544	455
10-03-95	12h00	70	240,5	329	-34	19	35	917	2851	1028	429	789
10-03-95	18h30	76,5	187,8	413	-49	20	40	1798	3523	1278	604	1089
11-03-95	13h00	95	177,8	399	-38	21	231	2652	3469	375	994	1150
12-03-95	22h00	128	100,7	734	0	20	2298	3613	4370	1778	1811	2030
13-03-95	11h30	141,5	89,1	1020	-84	54	3278	3845	4550	1864	2091	2294
13-03-95	18h30	148,5	85,9	1307	-110	192	3731	3896	4666	1578	1828	2380
14-03-95	14h00	168	73,8	1932	20	725	4492	4073	4858	1957	2450	2770
15-03-95	11h00	189	63,2	3226	28	2794	4581	4160	4992	2125	2409	3230
16-03-95	15h00	217	58	14305	112	2860	3935	3813	4684	1968	2133	3519
17-03-95	14h00	240	67,8	1885	375	3539	3884	3709	4559	1825	1707	3010
19-03-95	23h30	297,5	71,6	2002	417	2893	3942	3689	4415	1512	2126	2851
20-03-95	14h00	312	67	2426	502	3170	3816	3736	4182	2460	2343	3046

ESSAI CB10

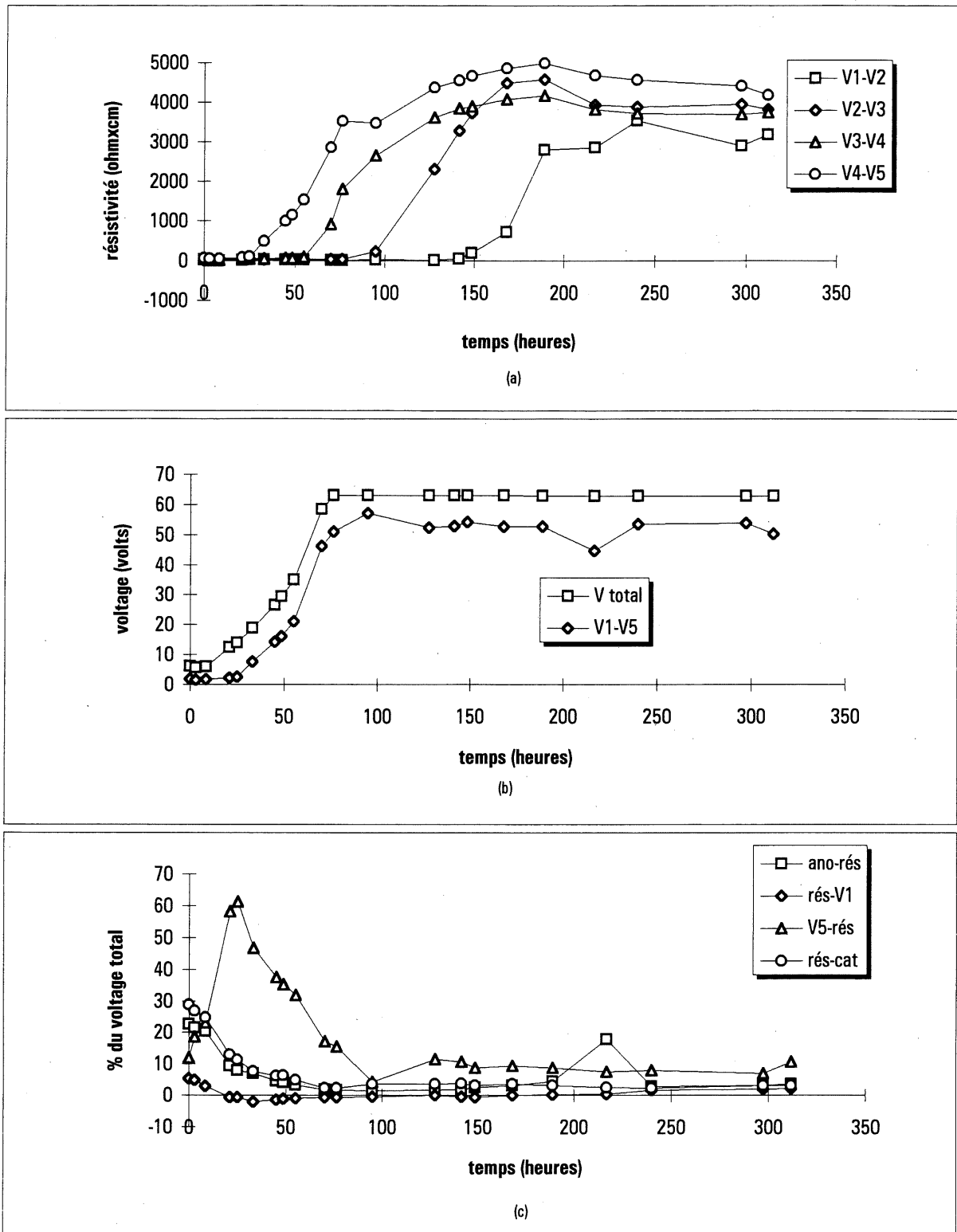


Figure K.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB10**section:** 80,5 cm²**longueur:** 16,4 cm

Réservoir anode: eau

Réservoir cathode: circulation de CH₃COOHPrétraitement: HNO₃ 8N équivalant à 0,87 mole d'ions H⁺ / Kg de sol sec

TABLEAU K.6 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE			ANODE		COMMENTAIRES
						pH	cond.(umho)	vol.(ml)	pH	cond.(umho)	
0	0,37	1360	3	0	0	2,65					
3	0,34	16446	27	-25	-25	3,33					
8,5	0,36	21542	35	0	-25	3,52					liquide rouge vin à la cathode
21	0,75	33055	64	-20	-45						
25	0,85	36705	77	0	-45	3,66					
33	1,15	43975	111	-5	-50	3,63					
45	1,61	54857	179	0	-50						
48,5	1,78	58040	204	-5	-55	3,46					
55	2,12	63923	257	-5	-60	3,5					échantillonnage - le plomb commence à plaquer
70	3,55	77150	428	-40	-100	3,4					
76,5	3,82	82161	513	-20	-120	4,03					
95	3,82	94336	726	-10	-130	3,12					
128	3,82	110879	1016	-60	-190	3,11					
141,5	3,82	115491	1096	-60	-250	3,43					
148,5	3,82	117696	1135	-40	-290	3,15					
168	3,82	123301	1233	-110	-400	3,1					
189	3,81	128480	1323	-140	-540	3,25					
217	3,81	134588	1430	-190	-730						
240	3,81	139796	1521	-190	-920	3,34					remplacement de l'anode
297,5	3,81	154224	1773	-150	-1070	4,08					
312	3,81	157842	1836	-150	-1220	2,4					

ESSAI CB10

TABLEAU K.7 BILAN DE MASSE

CHROME - bilan: 63% extrait

cathode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
8,5	100	625	114	2036	1	1
25	100	625	77	1189	1	2
55	70	625	81	1281	1	2
glob.(55)	2030	625	69	1006	12	14
168	100	250	80	503	0	14
glob.(168)	2340	625	69	1006	13	27
glob.(168)	1080	250	84	540	3	31
glob.(fin)	2070	250	40	326	4	35
dépôt cat.	685	25	79	66	0	35

anode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
8,5	100	625	176	3455	2	2
25	100	625	125	2288	1	3
55	40	625	162	3135	1	4
128	50	6250	95	16011	5	8
168	85	625	290	6065	3	11
glob.(168)	400	625	229	4668	11	22
glob.(240)	540	625	80	1680	5	27
glob.(fin)	525	250	37	300	1	28

PLOMB - bilan: 27% extrait

cathode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
8,5	100	10	53	20	0	0
25	100	25	66	64	0	0
55	70	25	99	102	0	0
glob.(55)	2030	10	44	16	1	1
168	100	25	43	38	0	1
glob.(168)	2340	1	427	19	1	2
glob.(168)	1080	10	54	20	1	3
glob.(fin)	2070	10	67	29	1	4
dépôt cat.	685	250	84	921	15	19

anode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
8,5	100	25	61	58	0	0
25	100	25	78	78	0	0
55	40	25	146	155	0	0
128	50	625	112	2906	3	4
168	85	250	58	551	1	5
glob.(168)	400	25	240	261	2	7
glob.(240)	540	1	312	15	0	8
glob.(fin)	525	1	81	4	0	8

ESSAI CB10

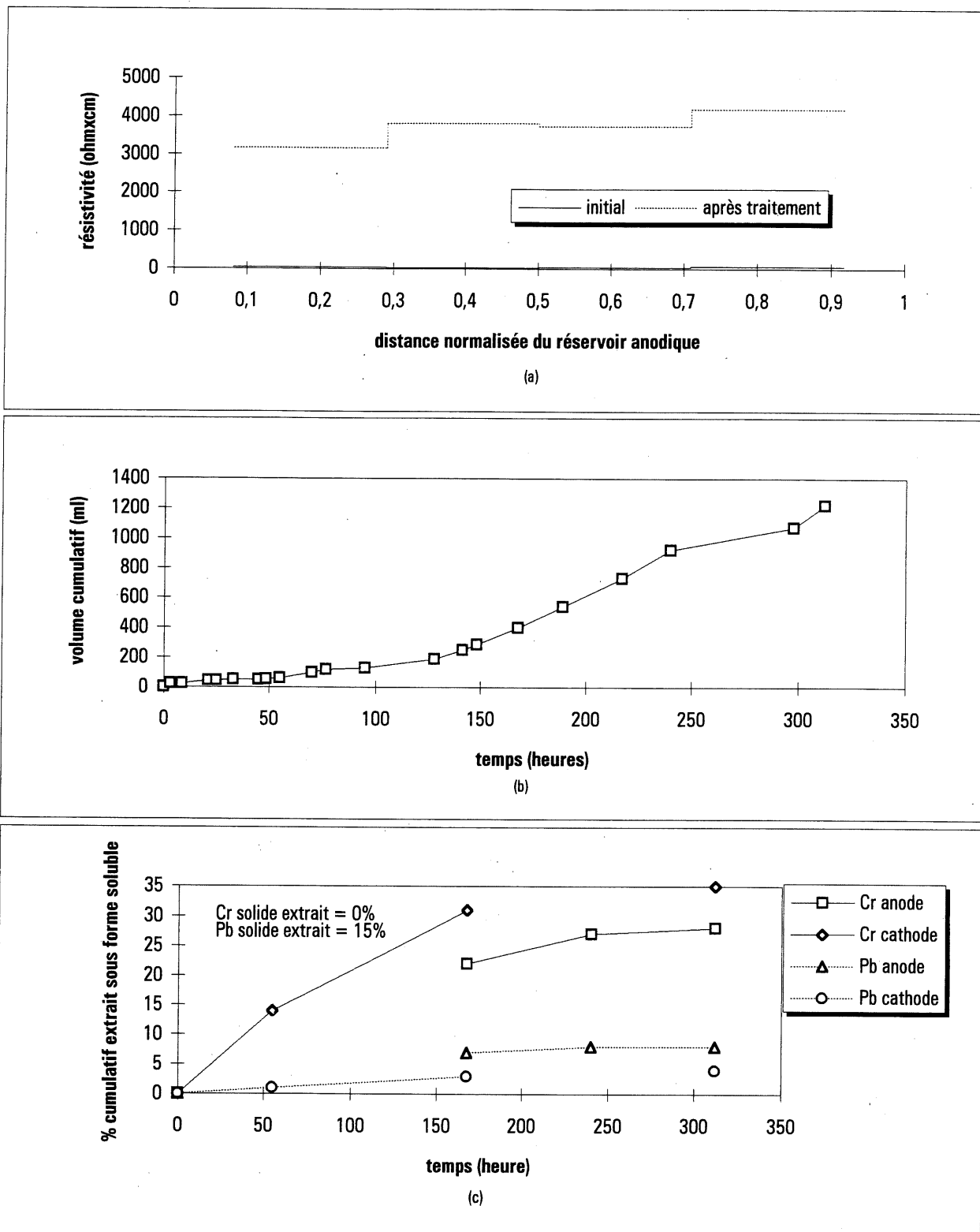


Figure K.3 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique cathode vers anode(b) et de l'extraction des métaux (c).

Annexe L

ESSAI CB11 - sol numéro 5

Du 4 au 19 avril 1995

TABLEAU L.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	16,35	1,97	7962	21428	56	1720	1347	87
<i>sol cont. 2</i>	16,3	1,92	7209	23080	48	1692	1321	87
<i>sol cont. 3</i>	16,26	2,05	6886	23080	45	1780	1189	89
moyenne*	16,30	1,98	7352	22529	50	1731	1286	88

TABLEAU L.2 CARACTÉRISATION DU SOL À t=55h (tranche du haut)

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>anode</i>	16,42	1,88	7274	22392	49	1789	1426	87
<i>centre</i>	18,24	1,81	9396	23218	55	1776	1216	88
<i>cathode</i>	20,05	2,36	2078	2996	71	608	952	69
moyenne*	18,24	2,02	6249	16202	55	1391	1198	85

TABLEAU L.3 CARACTÉRISATION DU SOL À t=300,5h (tranche du haut)

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>anode</i>	19,95	2,35	3538	196	99	734	192	95
<i>centre</i>	20,87	2,32	3080	209	99	320	195	87
<i>cathode</i>	21,2	2,28	3692	119	99	418	68	97
moyenne*	20,67	2,32	3437	175	99	491	152	94

TABLEAU L.4 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT (tranche du bas)

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>anode</i>	17,06	2,51	2273	216	98	231	93	93
<i>centre</i>	16,52	2,25	3739	143	99	439	62	98
<i>cathode</i>	16,38	2,26	3747	85	100	718	67	98
moyenne*	16,65	2,34	3253	148	99	463	74	97

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB11

TABLEAU L.5 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
04-04-95	15h00	0	0,57	1,79	0,9	0,75	0,84	0,91	0,98	1,34	8,34
04-04-95	17h30	2,5	0,86	1,24	0,87	0,71	0,82	0,9	1,13	1,57	8,1
04-04-95	21h00	6	0,8	1,19	0,85	0,8	0,75	0,82	1,14	1,56	7,95
05-04-95	1h00	10	0,92	1,04	0,85	0,81	0,76	0,79	1,45	1,55	8,21
05-04-95	13h00	22	1,46	0,5	0,82	0,79	0,79	1,19	2,34	1,51	9,19
06-04-95	1h00	34	1,43	0,49	0,77	0,73	0,96	2,2	1,7	1,38	9,68
06-04-95	13h30	46,5	1,38	0,51	0,78	0,72	0,52	3,09	1,23	1,36	9,54
06-04-95	22h00	55	1,45	0,44	0,77	0,71	0,91	3,18	1,32	1,27	10,09
06-04-95	23h30	56,5	1,75	0,47	0,8	0,72	1,22	3,8	5,39	2,62	16,88
07-04-95	14h00	71	1,47	0,5	0,79	1,21	2,49	4,9	1,45	1,03	13,25
07-04-95	22h30	79,5	1,55	0,48	0,78	3,06	1,26	3,87	1,86	1,18	14,14
08-04-95	20h00	101	2,68	0,52	0,68	2,41	3,23	3,97	2,12	1,26	16,93
09-04-95	15h00	120	1,4	0,37	1,34	3,71	3,21	4,56	2,04	1,23	17,84
09-04-95	23h00	128	1,4	0,25	2,57	3,88	3,37	4,27	1,57	1,29	18,75
10-04-95	9h00	138	1,44	0,67	3,27	3,95	2,99	4,19	2,18	1,39	20,1
10-04-95	17h00	146	1,61	0,85	3,75	3,67	2,9	3,88	1,44	1,69	19,83
11-04-95	10h30	163,5	1,51	0,89	2,44	3,3	2,3	3,24	2,02	1,39	17,2
11-04-95	15h00	168	1,57	0,68	2,27	2,94	2,1	3,3	1,86	1,17	15,76
11-04-95	22h00	173	1,7	0,54	2,45	1,85	2,42	9,5	3,85	1,32	23,44
12-04-95	13h00	188	1,82	0,58	1,07	2,44	3,97	3,05	1,15	1,08	15,23
13-04-95	2h00	201	1,81	0,71	1,12	2,83	2,18	2,61	1,84	1,48	15,08
13-04-95	13h30	212,5	1,76	0,96	1,26	2,39	1,8	4,54	1,8	1,95	16,52
13-04-95	23h30	222,5	2,34	0,75	1,56	1,99	3,32	5,23	1,77	1,79	18,42
14-04-95	15h00	238	2,88	0,65	0,84	2,18	3,41	3,72	1,94	1,9	17,65
16-04-95	11h00	271	2,28	1,07	1,82	3,2	3,65	4,57	0,67	1,05	18,19
17-04-95	9h00	293	1,95	0,86	1,56	2,66	1,52	3,75	2,46	1,13	16,15
17-04-95	16h30	300,5	1,91	0,78	1,42	2,59	1,96	3,95	1,94	1,36	15,96
17-04-95	24h00	307	2,02	0,78	1,61	2,45	2,32	6,78	1,21	1,61	18,64
18-04-95	17h30	324,5	1,84	0,58	1,32	3,01	3,12	3,93	2,69	1,95	18,22
19-04-95	13h00	344	1,78	0,72	1,68	2,71	3,03	4,53	3,35	1,37	19,32

ESSAI CB11

TABLEAU L.6 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
04-04-95	15h00	0	251	168	178	72	59	66	72	96	423	108
04-04-95	17h30	2,5	254	250	122	69	55	64	71	109	490	103
04-04-95	21h00	6	254	233	117	67	62	58	64	110	487	102
05-04-95	1h00	10	254	268	102	67	63	59	62	140	484	105
05-04-95	13h00	22	256	421	49	64	61	61	93	225	468	116
06-04-95	1h00	34	248	426	49	62	58	76	177	169	441	127
06-04-95	13h30	46,5	249	409	51	63	57	41	247	122	433	124
06-04-95	22h00	55	249	430	44	62	56	72	255	130	404	131
06-04-95	23h30	56,5	252	513	46	64	56	95	301	526	824	217
07-04-95	14h00	71	252	431	49	63	95	195	388	142	324	171
07-04-95	22h30	79,5	252	454	47	62	239	99	306	182	371	182
08-04-95	20h00	101	252	786	51	54	188	253	314	207	396	218
09-04-95	15h00	120	251	412	37	107	291	252	362	200	389	231
09-04-95	23h00	128	251	412	25	206	305	265	339	154	408	242
10-04-95	9h00	138	251	424	66	262	310	235	333	214	439	260
10-04-95	17h00	146	251	474	84	300	288	228	308	141	534	256
11-04-95	10h30	163,5	249	448	89	197	261	182	259	200	443	224
11-04-95	15h00	168	249	466	68	183	233	166	264	184	373	205
11-04-95	22h00	173	247	508	54	199	148	193	767	383	424	308
12-04-95	13h00	188	257	523	56	84	187	304	237	110	333	192
13-04-95	2h00	201	257	520	69	88	217	167	202	176	457	190
13-04-95	13h30	212,5	258	504	93	98	183	138	351	172	599	208
13-04-95	23h30	222,5	266	650	70	118	147	246	392	164	534	225
14-04-95	15h00	238	256	831	63	66	168	263	290	186	588	224
16-04-95	11h00	271	255	661	104	144	247	282	357	65	326	231
17-04-95	9h00	293	255	565	84	123	206	117	293	237	351	206
17-04-95	16h30	300,5	256	551	76	112	199	151	308	186	421	202
17-04-95	24h00	307	261	572	74	124	185	175	518	114	489	232
18-04-95	17h30	324,5	261	521	55	102	227	236	300	254	592	227
19-04-95	13h00	344	268	491	67	126	199	223	337	308	405	234

ESSAI CB11

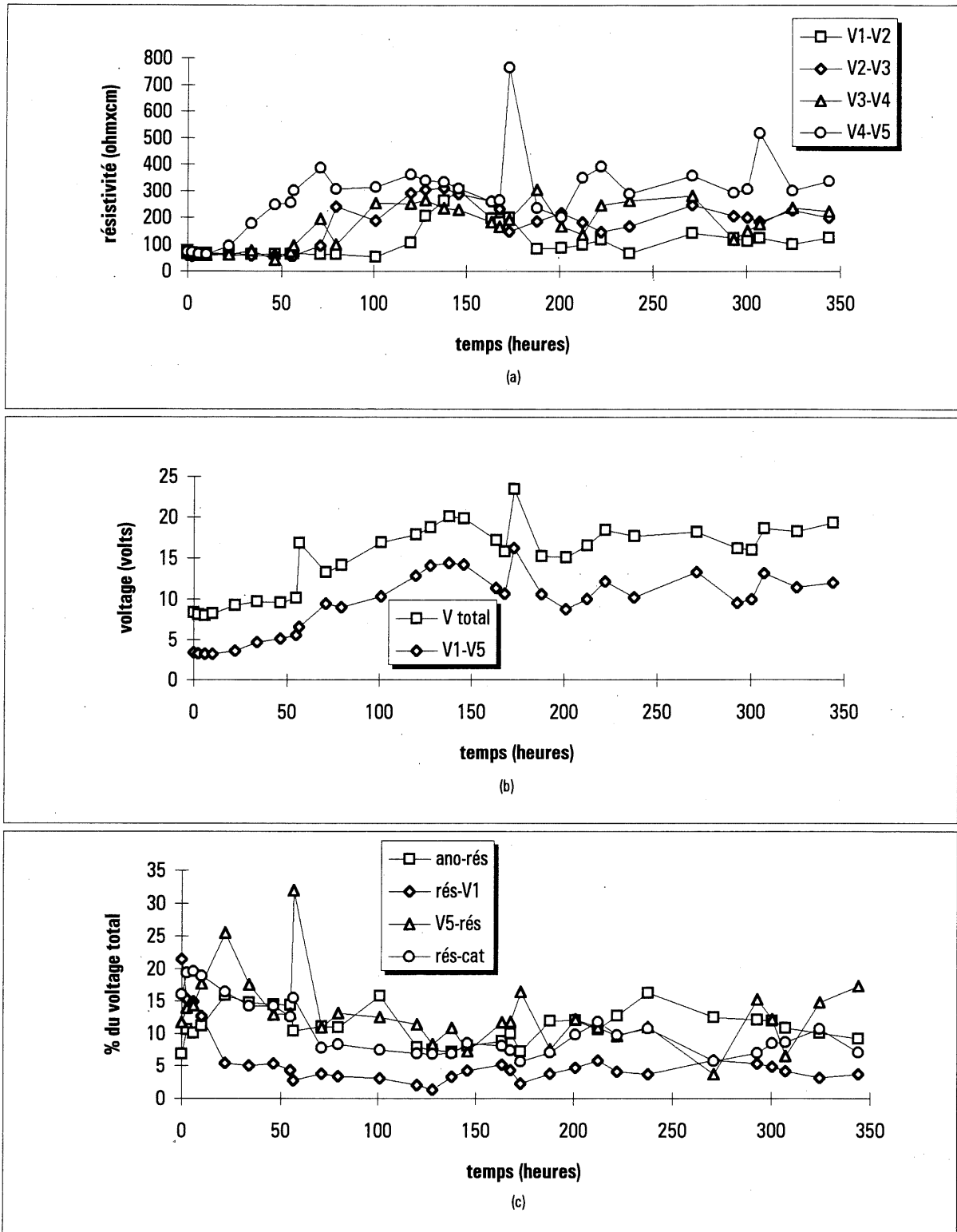


Figure L.1 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB11

section: 77,1 cm²

longueur: 16,4 cm

Réservoir anode: eau

Réservoir cathode: circulation de HCl

Prétraitement: HCl 8N équivalent à 0,87 mole d'ions H⁺ / Kg de sol sec

TABLEAU L.7 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE			ANODE		COMMENTAIRES
						pH	cond.(umho)	vol.(ml)	pH	cond.(umho)	
0	0,51	0	0			1,38					liquides verts à l'anode et à la cathode
2,5	0,49	2273	5			3,21					
6	0,48	5473	12			2,53					
10	0,50	9131	21	-10	-10	2,48					la pénétration d'un front est visible à la cathode (le sol est plus pâle) collecte d'une boue au fond du réservoir cathodique; électrodéposition observée
22	0,56	20147	47	-12	-22	2,41					
34	0,59	31033	76	-14	-36	2,8					
46,5	0,58	42215	106	-7	-43	1,73					le front continue de progresser vers l'anode; un front avançant vers la cathode est visible
55	0,61	49835	126	-15	-58	2,1					
56,5	1,02	51188	131	0	-58	2,73					
71	0,80	64342	186	-172	-230	1,44					il ya une couche très dure d'environ 1mm d'épaisseur électrodéposée sur la cathode
79,5	0,86	72053	216	-50	-280	2,12					
101	1,03	91558	300	-128	-408	2,1					
120	1,08	108761	383	-92	-500	2,3					arrêt de deux heures; niveau du réservoir cathodique sous le déversoir
128	1,14	115989	420	-48	-548	1,93					
138	1,22	125025	468	-87	-635	2,26					
146	1,20	132254	509	-79	-714	1,75					liquide plus pâle à la cathode
163,5	1,04	148004	590	-153	-867	1,97					
168	0,96	152038	608	-38	-905	1,7					
173	1,42	156502	632	-62	-967	1,55					augmentation évidente de l'électrodéposition par rapport aux jours précédents
188	0,92	170110	705	-124	-1091	0,92					
201	0,91	182138	756	-76	-1167	1,94					
212,5	1,00	192798	803	-118	-1285	1,97					
222,5	1,12	202230	849	-104	-1389	1,88					
238	1,07	216794	922	-130	-1519	1,57					
271	1,10	247147	1073	-380	-1899	0,82					
293	0,98	267343	1169	-220	-2119	1,67					
300,5	0,97	274242	1200	-50	-2169	1,75					
307	1,13	280291	1229	-100	-2269	1,15					
324,5	1,10	296734	1313	-150	-2419	1,49					
344	1,17	315302	1410	-200	-2619	2,12					

ESSAI CB11

TABLEAU L.8 BILAN DE MASSE

CHROME - bilan: 56% extrait

cathode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
34	20	625	203	2101	0	0
55	20	625	193	1964	0	0
glob.(55)	700	625	168	1620	6	7
boue(55)	500	250	173	675	2	9
168	20	625	206	2143	0	9
glob.(168)	910	625	202	2088	11	20
dépôt(168)	1000	625	87	505	3	23
222,5	20	25	409	257	0	23
300,5	20	25	280	167	0	23
324,5	20	25	225	129	0	23
glob.(fin)	1475	25	286	171	1	24
dépôt(fin)	1000	1	334	8	0	24

anode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
34	20	625	412	4979	1	1
55	20	6250	84	4634	1	1
glob.(55)	190	625	400	4813	5	6
168	20	625	102	711	0	6
glob.(168)	910	625	382	4566	24	30
glob.(fin)	1475	25	405	254	2	32

PLOMB - bilan: 39% extrait

cathode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
34	20	25	307	316	0	0
55	20	25	40	35	0	0
glob.(55)	700	25	91	89	2	2
boue(55)	500	25	208	212	3	4
168	20	10	71	27	0	4
glob.(168)	910	25	45	40	1	5
dépôt(168)	1000	625	30	610	15	20
222,5	20	1	399	17	0	20
300,5	20	1	106	4	0	20
324,5	20	1	147	6	0	20
glob.(fin)	1475	10	38	11	0	20
dépôt(fin)	1000	25	420	440	11	31

anode						
temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
34	20	625	48	1084	1	1
55	20	625	61	1426	1	1
glob.(55)	190	25	432	448	2	3
168	20	25	68	64	0	3
glob.(168)	910	25	184	187	4	7
glob.(fin)	1475	10	59	20	1	8

ESSAI CB11

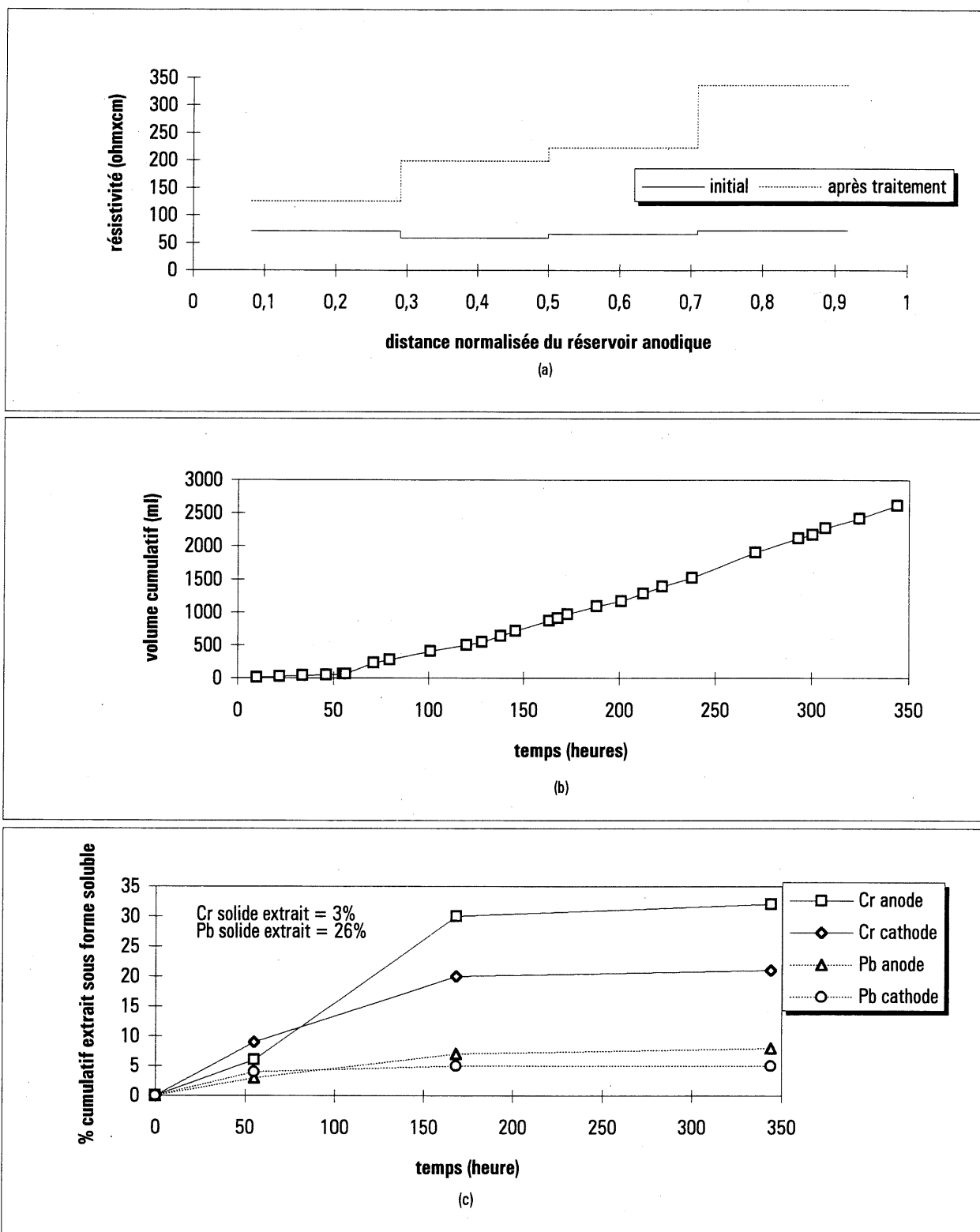


Figure L.2 Variation dans le temps de la résistivité (a), du débit électro-osmotique cathode vers anode(b) et de l'extraction des métaux (c).

Annexe M

ESSAI CB13 - sol numéro 5

Du 22 au 30 juin 1995

TABLEAU M.1 CARACTÉRISATION DU SOL AVANT TRAITEMENT

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>sol cont. 1</i>	21,49	4,97	9431	3215	93	1900	0	100
<i>sol cont. 2</i>	21,27	4,97	8113	3401	91	2417	0	100
<i>sol cont. 3</i>	21,41	4,95	8290	3735	90	1838	0	100
moyenne*	21,39	4,96	8611	3450	91	2052	0	100

TABLEAU M.2 CARACTÉRISATION DU SOL À t=117h (tranche du haut)

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
<i>anode</i>	21,16	4,64	6630	227	99	1869	0	100
<i>centre</i>	20,76	4,13	6741	251	99	1842	0	100
<i>cathode</i>	20,37	4,39	6446	483	98	1872	0	100
moyenne*	20,76	4,39	6606	320	99	1861	0	100

TABLEAU M.3 CARACTÉRISATION DU SOL APRÈS TRAITEMENT

réservoir	42	40	32	30	22	20	12	10	réservoir
anode	43	41	33	31	23	21	13	11	cathode

zone	w%	pH sol	Cr sol (ppm)	Cr eau (ppm)	Cr sur sol (%)	Pb sol (ppm)	Pb eau (ppm)	Pb sur sol (%)
42	18,40	4,98	5192	n.d.	n.d.	1829	n.d.	n.d.
43	19,61	5	5752	104	100	1932	0	100
40	18,14	4,92	6049	n.d.	n.d.	1983	n.d.	n.d.
41	18,70	4,98	4853	112	100	1861	0	100
32	18,46	4,48	4871	n.d.	n.d.	1781	n.d.	n.d.
33	19,16	4,58	5627	151	99	1894	0	100
30	18,71	4,76	5852	n.d.	n.d.	1908	n.d.	n.d.
31	19,02	4,86	6132	169	99	1887	0	100
22	18,39	4,47	5590	n.d.	n.d.	1805	n.d.	n.d.
23	19,20	4,83	5725	172	99	2503	0	100
20	18,59	4,6	5958	n.d.	n.d.	2563	n.d.	n.d.
21	19,02	4,98	6299	192	99	2477	0	100
12	18,12	4,92	6379	n.d.	n.d.	1940	n.d.	n.d.
13	18,43	4,38	7119	228	99	1921	0	100
10	18,08	4,58	6163	n.d.	n.d.	1796	n.d.	n.d.
11	18,26	4,79	5538	256	99	1779	7	100
moyenne*	18,64	4,76	5819	173	99	1991	1	100

* moyenne pondérée lorsqu'il s'agit du % fixé sur le sol.

ESSAI CB13

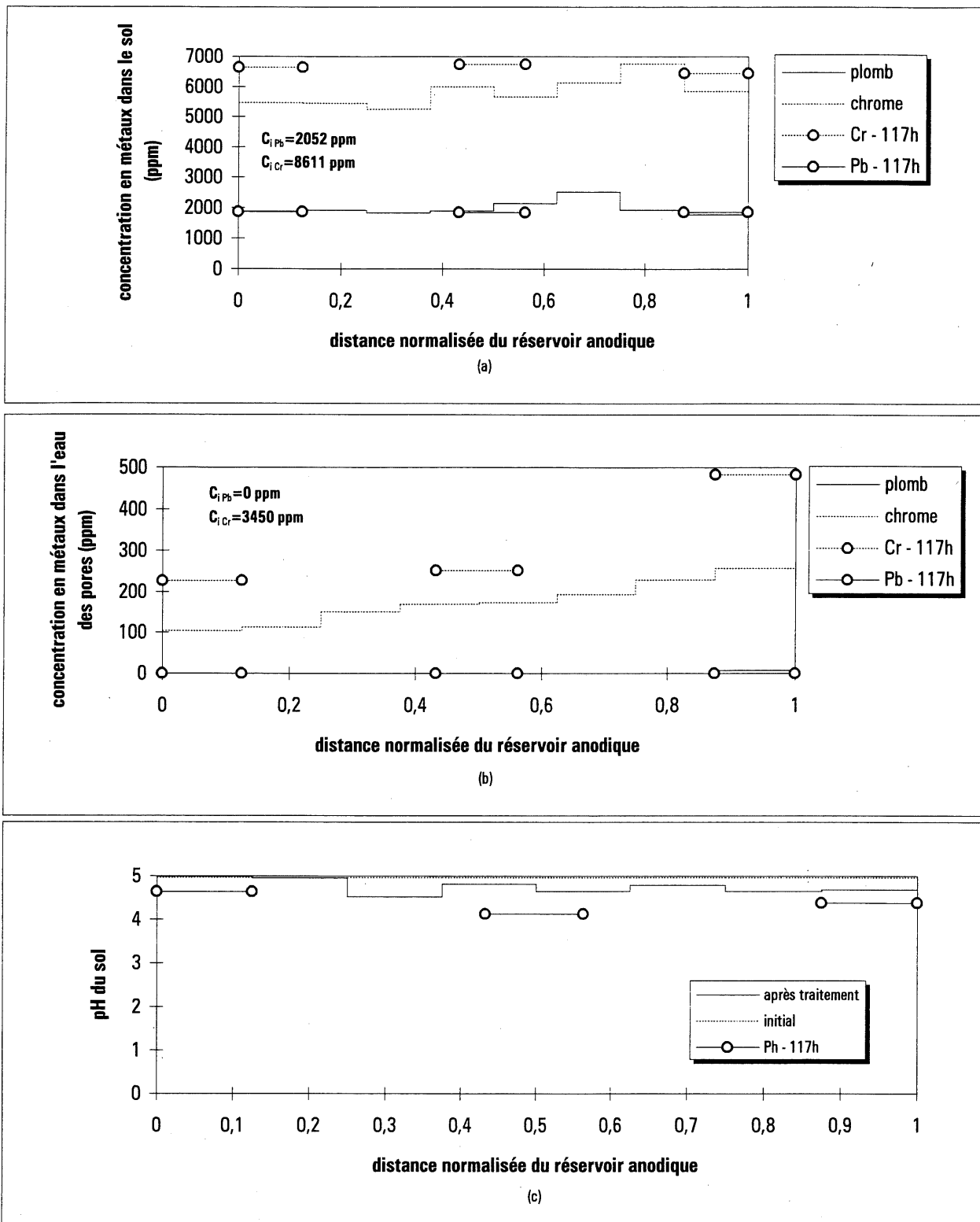


Figure M.1 Distribution du plomb et du chrome après traitement (a et b) et distribution du pH (c).

ESSAI CB13

TABLEAU M.4 ÉVOLUTION DU POTENTIEL EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	rés-ano (V)	V1-rés (V)	V2-V1 (V)	V3-V2 (V)	V4-V3 (V)	V5-V4 (V)	rés-V5 (V)	cat-rés (V)	cat-ano (V)
22-06-95	14h30	0	3,71	15,9	7,42	6,28	6,34	7,44	10,85	3,71	62,1
22-06-95	15h30	1	2,22	15,53	8,43	7,2	7,18	8,6	9,69	2,79	61,9
22-06-95	16h30	2	1,91	15,99	9,63	7,29	7,36	8,98	8,12	2,17	61,6
22-06-95	21h00	6,5	1,28	8,47	20,04	7,62	6,74	8,1	5,52	1,43	59,4
23-06-95	1h30	11	1,13	5,42	22,71	10,46	8,59	7,52	4,69	1,21	61,8
23-06-95	12h00	21,5	0,88	4,63	16,31	15,6	7,06	7,6	7,94	2,06	62,2
23-06-95	22h30	32	0,86	5,12	15,48	17,96	8,26	7,62	5,72	1,17	62,2
24-06-95	8h30	42	0,61	5,18	14,55	16,71	11	7,6	5,41	1,14	62,3
25-06-95	17h00	74,5	0,6	4,83	12,45	13,85	14,72	8	6,44	1,35	62,5
25-06-95	22h30	80	0,61	4,93	11,99	13,43	15,44	8,1	6,46	1,34	62,5
26-06-95	17h00	98,5	0,63	4,77	11	12,56	15,28	9,93	6,88	1,38	62,6
27-06-95	00h30	106	0,64	4,8	10,9	12,33	14,45	11,46	6,51	1,3	62,5
27-06-95	11h00	116,5	0,67	4,84	10,9	11,89	13,36	13,52	5,87	1,27	62,7
28-06-95	00h30	129,5	0,66	4,94	10,69	11,39	12,47	14,79	6,31	1,23	62,6
28-06-95	17h00	146	0,67	4,77	10,1	10,75	11,79	14,14	8,52	1,78	62,7
29-06-95	17h30	170,5	0,72	4,95	10,11	10,76	11,54	14	8,64	1,82	62,7
29-06-95	00h00	177	0,73	5,08	10,3	10,89	11,65	14,13	8,11	1,6	62,7
30-06-95	14h00	191	0,76	5,04	10,2	10,65	11,46	14,03	8,52	1,84	62,7

ESSAI CB13

TABLEAU M.5 ÉVOLUTION DE LA RÉSISTIVITÉ EN FONCTION DU TEMPS ET DE LA POSITION

date	heure	temps (heure)	courant (mA)	rés-ano Ohmxcm	V1-rés Ohmxcm	V2-V1 Ohmxcm	V3-V2 Ohmxcm	V4-V3 Ohmxcm	V5-V4 Ohmxcm	rés-V5 Ohmxcm	cat-rés Ohmxcm	cat-ano Ohmxcm
22-06-95	14h30	0	160	1713	2474	933	774	781	927	1668	1839	1259
22-06-95	15h30	1	204	804	1896	831	696	694	840	1169	1084	985
22-06-95	16h30	2	225	627	1770	861	639	645	795	888	765	888
22-06-95	21h00	6,5	220	430	959	1832	683	604	734	617	515	876
23-06-95	1h30	11	210	398	643	2175	982	806	714	549	457	955
23-06-95	12h00	21,5	124	524	930	2645	2480	1122	1222	1575	1317	1628
23-06-95	22h30	32	116,3	546	1096	2677	3044	1400	1306	1210	798	1736
24-06-95	8h30	42	107	421	1205	2735	3078	2026	1416	1244	845	1889
25-06-95	17h00	74,5	83	534	1449	3017	3289	3496	1921	1909	1290	2444
25-06-95	22h30	80	80	563	1534	3014	3309	3804	2018	1986	1328	2535
26-06-95	17h00	98,5	69	675	1721	3206	3588	4365	2868	2453	1586	2944
27-06-95	00h30	106	67	706	1784	3272	3627	4251	3409	2390	1538	3027
27-06-95	11h00	116,5	63	786	1913	3479	3720	4180	4277	2292	1598	3230
28-06-95	00h30	129,5	56	871	2197	3839	4009	4389	5264	2772	1742	3627
28-06-95	17h00	146	52,1	950	2280	3898	4067	4460	5409	4023	2709	3905
29-06-95	17h30	170,5	51,9	1025	2375	3917	4086	4383	5376	4095	2780	3920
29-06-95	00h00	177	53	1018	2387	3908	4050	4332	5313	3764	2394	3839
30-06-95	14h00	191	51,8	1084	2423	3960	4052	4361	5398	4046	2816	3928

ESSAI CB13

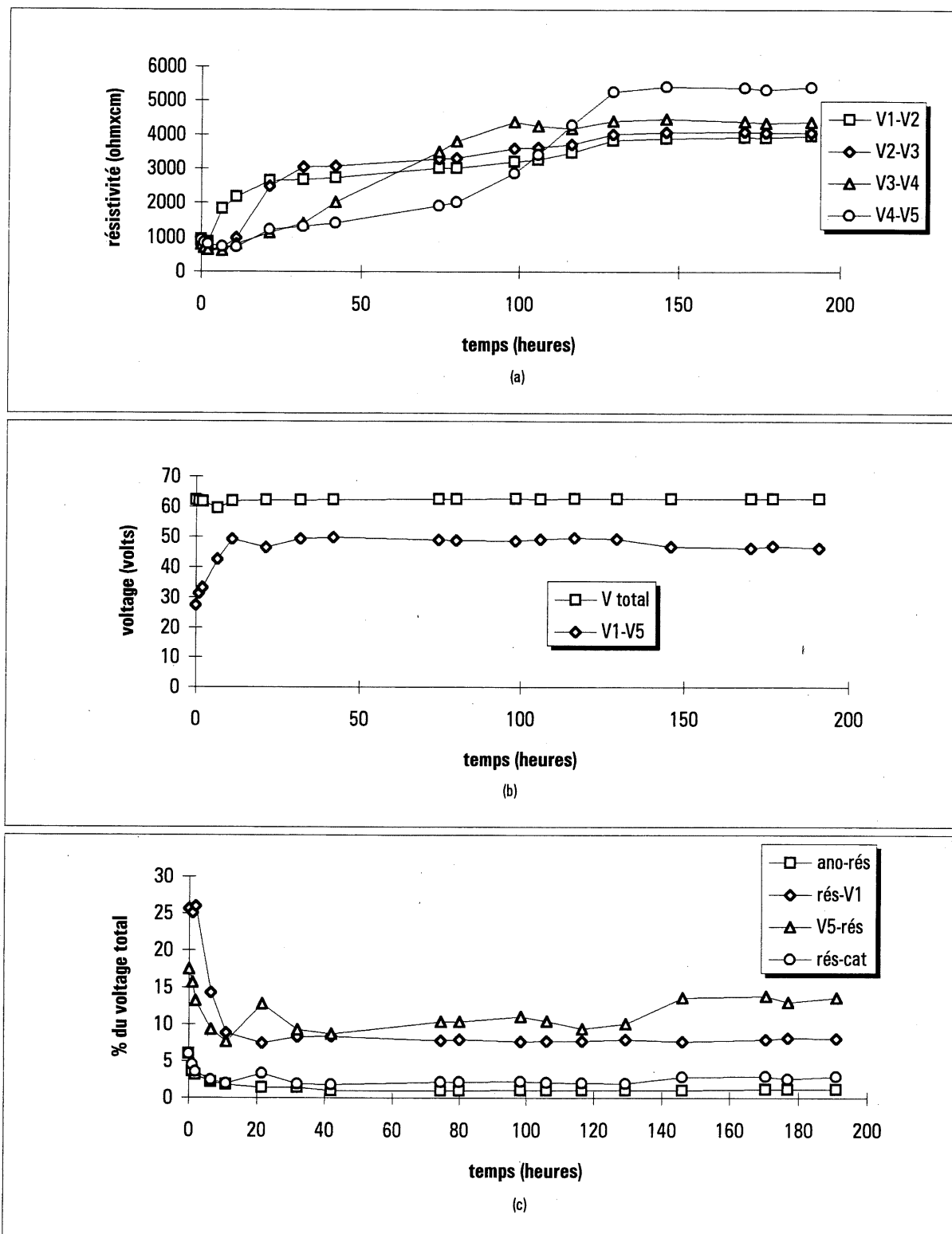


Figure M.2 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du voltage (b et c).

ESSAI CB13**section:** 76 cm²**longueur:** 16,44 cm

Réservoir anode: eau

Réservoir cathode: circulation de CH₃COOHPrétraitement: CH₃COOH 3,42M équivalent à 0,34 mole d'ions H⁺ / Kg de sol sec

TABLEAU M.6 AUTRES RÉSULTATS

temps (heure)	(cat-ano)/L volt/cm	charges (C)	énergie (Wh)	vol. E-O (ml)	vol. cum. (ml)	CATHODE			ANODE		COMMENTAIRES
						pH	cond.(umho)	vol.(ml)	pH	cond.(umho)	
0	3,76	0	0		0						le fluide cathodique devient rouge vin dans les deux ou trois premières heures de l'essai. Ce fluide devient plus pâle vers la fin de l'essai.
1	3,75	655	11		0						
2	3,73	1427	25		0	3,29			2,03		
6,5	3,60	5032	85		0	3,6			1,45		
11	3,75	8515	144		0	3,81			1,27		
21,5	3,77	14828	252		0	3,02			0,99		électrodéposition à la cathode échantillonnage du sol
32	3,77	19369	331		0	3,61			0,93		
42	3,78	23389	400		0	3,63					
74,5	3,79	34504	593		0	3,27			1,02		
80	3,79	36117	621		0						
98,5	3,79	41079	707		0	3,27			1,16		
106	3,79	42915	739	-242	-242	3,27					
116,5	3,80	45372	782	-68	-310						
129,5	3,79	48157	830	-90	-400	3,21			1,54		
146	3,80	51367	886	-101	-501	2,73			1,56		
170,5	3,80	55954	966	-143	-644						
177	3,80	57181	988	-60	-704						
191	3,80	59822	1034	-104	-808	2,53			1,79		

ESSAI CB13**TABLEAU M.7 BILAN DE MASSE****CHROME - résiduel sol: 32% extrait ; bilan: 37% extrait****cathode**

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
n.d.	1530	50	242	323	3	3
n.d.	2500	125	166	524	7	9
n.d.	2610	250	205	1338	18	28
dépôt	710	10	132	32	0	28

anode

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
cum.(t=177)	770	625	130	1951	8	8
rés.anode	510	125	160	502	1	9

PLOMB - résiduel sol: 3% extrait ; bilan: 2% extrait**cathode**

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
n.d.	1530	1	136	8	0	0
n.d.	2500	1	105	6	0	1
n.d.	2610	1	194	12	1	1
dépôt	710	10	82	44	1	2

anode

temps	volume	dilution	A.A.	concent.	% p/r total	cumulatif
cum.(t=177)	770	1	17	0	0	0
rés.anode	510	1	46	2	0	0

ESSAI CB13

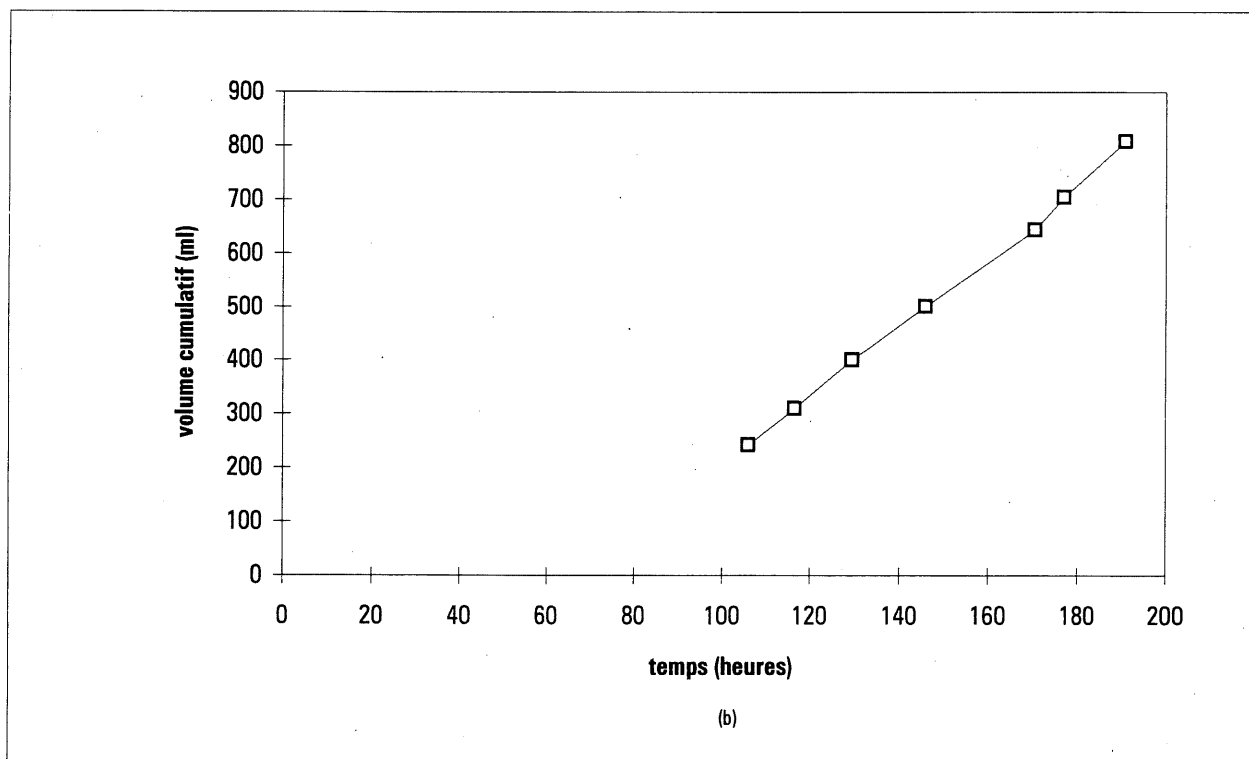
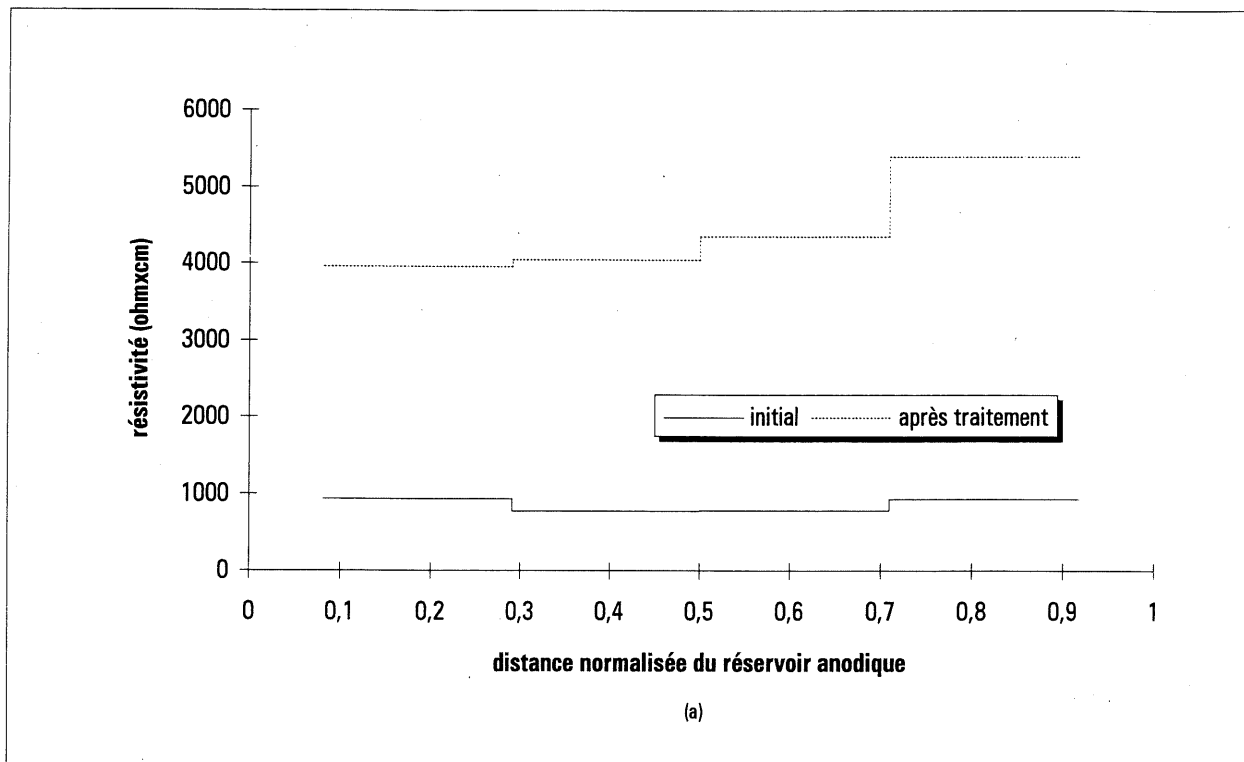


Figure M.3 Variation dans le temps de la résistivité (a) et du débit électro-osmotique cathode vers anode(b).

Appendice 1

Calcul des vitesses de migration

1- Vitesse du front d'acétates lors des essais CB1 à CB4

distance entre les plots V1 et V5 et les plaques de plastique: 1,5cm

distance entre les plots: 3,3cm

porosité moyenne des essais CB1 à CB4: 0,37

hypothèses:

- Le front d'acétates pénètre du côté cathode à $t=0$.
- On considère que le front d'acétates a traversé la zone V4-V5 lorsque la résistivité se stabilise dans cette zone, ou lorsque la résistivité augmente dans la zone V3-V4.
- La vitesse du front est due à la migration et au débit électro-osmotique.
- On considère que la vitesse des acétates est la même dans les quatre essais, ce qui permet de faire un calcul plus précis.
- La vitesse des acétates est constante (avant la rencontre avec le front acide) et elle est reliée au gradient électrique qui existe suite à la pénétration des acétates.
- $S_r = 100\% \rightarrow \Theta = nS_r = 37\%$

CB1: passage du front en V4 entre $t = 17h$ et $t = 30h$
 $\Delta V_{V5-V4} \approx 3,17V$ après le passage du front

CB2: passage du front en V4 entre $t = 20h$ et $t = 30h$
 $\Delta V_{V5-V4} \approx 4,27V$ après le passage du front

CB3: passage du front en V4 entre $t = 24,5h$ et $t = 29h$
 $\Delta V_{V5-V4} \approx 3,97V$ après le passage du front

CB4: passage du front en V4 entre $t = 25,5h$ et $t = 40h$
 $\Delta V_{V5-V4} \approx 4,46V$ après le passage du front

$$\Delta t \approx \frac{(25,5 + 29)h}{2} - 0 = 27,25h$$

$$\Delta L = 1,5cm + 3,3cm = 4,8cm$$

$$\rightarrow v_{OAc} = 4,9 \times 10^{-5} cm/s$$

Vitesse due au débit électro-osmotique anode-cathode:

$$CB1: \text{à } t = 53,5h \text{ le volume cumulatif} = 80cm^3 \rightarrow Q = 4,15 \times 10^{-4} cm^3/s$$

$$CB2: \text{à } t = 47,4h \text{ le volume cumulatif} = 53cm^3 \rightarrow Q = 3,11 \times 10^{-4} cm^3/s$$

$$CB3: \text{à } t = 53,25h \text{ le volume cumulatif} = 10cm^3 \rightarrow Q = 0,52 \times 10^{-4} cm^3/s$$

$$CB4: \text{à } t = 44h \text{ le volume cumulatif} = 102cm^3 \rightarrow Q = 6,44 \times 10^{-4} cm^3/s$$

$$\rightarrow Q_{moyen} = 3,6 \times 10^{-4} cm^3/s$$

$$\rightarrow v_{eo \text{ moyen}} = \frac{Q_{moyen}}{\Theta A_{moyenne}} = \frac{3,6 \times 10^{-4}}{0,37 \times 71,4} = 1,4 \times 10^{-5} cm/s$$

Étant donné que v_{eo} moyen est dans le sens inverse de la migration des acétates:

$$\rightarrow v_{OAc \text{ migration}} = v_{OAc} + v_{eo} = 6,3 \times 10^{-5} cm/s$$

$$\Delta V_{V4-V5} = 3,97V \rightarrow \frac{\partial V}{\partial x_{moyen}} = \frac{3,97V}{3,3cm} = 1,2V/cm$$

$$\text{équation 2.22} \rightarrow \mu_{OAc}^* = \frac{v_{OAc \text{ migration}}}{\frac{\partial V}{\partial x_{moyen}}} = 5,3 \times 10^{-5} cm^2/V \cdot s$$

$$\tau_a = \frac{\mu_{OAc}^*}{\mu_{OAc}} = 0,12$$

2- Vitesse du front d'acétates lors des essais CB5 et CB6

porosité moyenne des essais CB5 et CB6: 0,41

hypothèses:

- Les mêmes que pour les essais CB1 à CB4.

CB5: passage du front en V4 entre $t = 22h$ et $t = 24h$
 $\Delta V_{V5-V4} \approx 9,15V$ après le passage du front

CB6: passage du front en V4 entre $t = 21,5h$ et $t = 28,5h$
 $\Delta V_{V5-V4} \approx 9,1V$ après le passage du front

$$\Delta t \approx \frac{(22 + 24)h}{2} - 0 = 23h$$

$$\Delta L = 1,5cm + 3,3cm = 4,8cm$$

$$\rightarrow v_{OAc} = 5,8 \times 10^{-5} cm/s$$

Vitesse due au débit électro-osmotique anode-cathode:

CB5: à $t = 50h$ le volume cumulatif = $104cm^3 \rightarrow Q = 5,78 \times 10^{-4} cm^3/s$

CB6: à $t = 46h$ le volume cumulatif = $66cm^3 \rightarrow Q = 3,99 \times 10^{-4} cm^3/s$

$$\rightarrow Q_{moyen} = 4,9 \times 10^{-4} cm^3/s$$

$$\rightarrow v_{eo\ moyen} = \frac{Q_{moyen}}{\Theta A_{moyenne}} = \frac{4,9 \times 10^{-4}}{0,41 \times 73,7} = 1,6 \times 10^{-5} cm/s$$

Étant donné que v_{eo} moyen est dans le sens inverse de la migration des acétates:

$$\rightarrow v_{OAc\ migration} = v_{OAc} + v_{eo} = 7,4 \times 10^{-5} cm/s$$

$$\Delta V_{V4-V5} = 9,13V \rightarrow \frac{\partial V}{\partial x_{moyen}} = \frac{9,13V}{3,3cm} = 2,77V/cm$$

$$\text{équation 2.22} \rightarrow \mu_{OAc}^* = \frac{v_{OAc\ migration}}{\frac{\partial V}{\partial x_{moyen}}} = 2,7 \times 10^{-5} cm^2/V \cdot s$$

$$\tau_a = \frac{\mu_{OAc}^*}{\mu_{OAc}} = 0,06$$

3- Vitesse du front d'acétates lors de l'essai CB7

distance entre les plots V1 et V7 et les grilles de plastique: 1,6cm

distance entre les plots: 6,4cm

porosité: 0,31

CB7: passage du front en V5 entre $t = 114h$ et $t = 119,5h$
 $\Delta V_{V5-V7} \approx 19,4V$ après le passage du front

$$\Delta t \approx \frac{(114 + 119,5)h}{2} - 0 = 116,75h$$

$$\Delta L = 1,6cm + 2 \cdot (6,4)cm = 14,4cm$$

$$\rightarrow v_{OAc} = 3,4 \times 10^{-5} cm/s$$

Vitesse due au débit électro-osmotique anode-cathode:

CB7: à $t = 178,5h$ le volume cumulé = $5787cm^3 \rightarrow Q = 9 \times 10^{-3} cm^3/s$

$$\rightarrow v_{eo} = \frac{Q}{\Theta A} = \frac{9 \times 10^{-3}}{0,31 \times 2550} = 1,1 \times 10^{-5} cm/s$$

Étant donné que v_{eo} moyen est dans le sens inverse de la migration des acétates:

$$\rightarrow v_{OAc \text{ migration}} = v_{OAc} + v_{eo} = 4,5 \times 10^{-5} cm/s$$

$$\Delta V_{V4-V5} = 19,4V \rightarrow \frac{\partial V}{\partial x} = \frac{19,4V}{12,8cm} = 1,52V/cm$$

$$\text{équation 2.22} \rightarrow \mu_{OAc}^* = \frac{v_{OAc \text{ migration}}}{\frac{\partial V}{\partial x}} = 3 \times 10^{-5} cm^2/V \cdot s$$

$$\tau_a = \frac{\mu_{OAc}^*}{\mu_{OAc}} = 0,07$$

4- Vitesse du front d'acétates lors de l'essai CB8

CB8: passage du front en V3 entre $t = 315h$ et $t = 338h$
 $\Delta V_{V3-V5} \approx 3,58V$ après le passage du front

$$\Delta t \approx \frac{(315 + 338)h}{2} - 48h \text{ (HCl jusqu'à } t = 48h) = 279h$$

$$\Delta L = 8,2cm$$

$$\rightarrow v_{OAc} = 8,16 \times 10^{-6} cm/s$$

Vitesse due au débit électro-osmotique anode-cathode = 0 (dans les 327 premières heures)

$$\frac{\partial V}{\partial x} = \frac{3,58V}{8,2cm} = 0,44V / cm$$

$$\text{équation 2.22} \rightarrow \mu_{OAc}^* = \frac{V_{OAc \text{ migration}}}{\frac{\partial V}{\partial x}} = 1,85 \times 10^{-5} cm^2 / V \cdot s$$

$$\tau_a = \frac{\mu_{OAc}^*}{\mu_{OAc}} = 0,04$$

5- Vitesse du front d'acétates lors de l'essai CB9

porosité: 0,31

CB9: passage du front en V4 entre t = 18h et t = 30h

passage du front en V3 entre t = 30h et t = 43h

→ faire une moyenne serait très imprécis, il est mieux de se fier à la figure 8.1

→ sort de V4-V3 un peu avant t = 43h, disons t = 43h

$$\Delta t \approx 43h$$

$$\Delta L = 8,2cm$$

$$\rightarrow v_{OAc} = 5,3 \times 10^{-5} cm/s$$

Vitesse due au débit électro-osmotique cathode - anode:

CB9: à t = 113h le volume cumulatif = 1125cm³ → Q = 2,76x10⁻³cm³/s

$$\rightarrow v_{eo} = \frac{Q}{\Theta A} = \frac{2,76 \times 10^{-3}}{0,31 \times 79,1} = 1,1 \times 10^{-4} cm/s$$

Appendice 2

Calculs généraux

1- Concentration maximale des ions H^+ et des acétates juste avant la rencontre des deux fronts.

Essais CB1 à CB4: durant les 41,5 premières heures $I = 125mA$

hypothèse: $S_r = 100\%$

$$\text{équation 2.11} \rightarrow n = \frac{0,125(3600)41,5}{96485} = 0,19 \text{ mole d'e}^-$$

$\rightarrow 0,19 \text{ mole d'ions } H^+ \text{ produits à l'anode et } 0,19 \text{ mole d'ions } OH^- \text{ remplacés par des acétates à la cathode}$

$$\text{volume du sol} \approx 1,2 \text{ litres} \rightarrow \frac{(\text{volume})nS_r}{2} = \frac{1,2 \times 0,37}{2} = 0,22 \text{ litres de fluide}$$

$$\rightarrow \text{concentration maximale des ions } H^+ \text{ et } CH_3COO^- = \frac{0,19}{0,22} \approx 0,9M$$

2- Effet de la rencontre des deux fronts.

Essais CB1 à CB4

hypothèses:

- Front d'acétates concentré à 0,6M juste avant la rencontre.
- Front d'ions H^+ concentré à 0,6M juste avant la rencontre.
- Les ions H^+ et CH_3COO^- sont exclusifs au lieu de rencontre.

$$(1) \quad \text{constante de dissociation de l'acide acétique: } \frac{[H^+][CH_3COO^-]}{CH_3COOH} = 1,75 \times 10^{-5}$$

$$(2) \quad \text{électroneutralité lors de la rencontre: } [H^+] = [CH_3COO^-]$$

$$(3) \quad \text{bilan de masse lors de la rencontre: } [H^+] + [CH_3COO^-] + 2[CH_3COOH] = 1,2M$$

$$(2) \text{ dans (3)} \rightarrow [\text{H}^+] + [\text{CH}_3\text{COOH}] = 0,6\text{M} \quad (4)$$

$$(1) \text{ dans (4)} \rightarrow \sqrt{1,75 \times 10^{-5} \times [\text{CH}_3\text{COOH}]} + [\text{CH}_3\text{COOH}] = 0,6\text{M}$$

$$\therefore [\text{H}^+] = [\text{CH}_3\text{COO}^-] = 3,2 \times 10^{-3}\text{M}$$

Appendice 3

Fractions d'un métal et ses complexes en solution

On calcule les fractions de l'ion métallique divalent en solution et de ses complexes avec les deux relations suivantes:

$$\text{frM}^{2+} = \frac{1}{1 + \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \beta_{ji} (A_j^-)^i}$$

$$\text{frMA}_{ji}^{-i+2} = \beta_{ji} (A_j^-)^i * \text{frM}^{2+}$$

frM^{2+} = fraction de l'ion métallique divalent en solution

m = nombre d'anions différents

n = nombre de complexes différents

(A_j^-) = concentration de l'anion A_j

β_{ji} = constante de formation correspondant à l'anion j et au complexe i

frMA_{ji}^{-i+2} = fraction du complexe en solution

Les constantes de formation β_{ji} sont données dans le tableau suivant:

système	$\log \beta_1$	$\log \beta_2$	$\log \beta_3$	$\log \beta_4$
Zn - Cl	0,43	0,61	0,53	0,2
Zn - OH	4,4	12,89	15,86	15,95
Pb - Cl	0,88	1,49	1,09	0,94
Pb - OH	7,82	10,88	13,94	16,3

Bibliographie

- ACAR, Y.B., ALSHAWABKEH, A.N. (1993) *Principles of electrokinetic remediation*, Environmental science and technology, vol. 27, no. 13, p. 2638-2647.
- BARD, A. J., FAULKNER, L. R. (1983) *Électrochimie* (traduction), Paris, Masson, 791 p.
- BARTLETT, R.J., JAMES, B.R., NRIAGU, J.O., NIEBOER, E. (1988) *Mobility and bioavailability of chromium in soils*, John Wiley and sons, p. 267-304.
- BEAULIEU, J-F. (1995) *Contrôle des pH dans la décontamination des sols par électrocinétique*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 235 p.
- BURNOTTE, F. (1993) *Contrôle des écoulements dans un silt par électrocinétique*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 200 p.
- CASAGRANDE, L. (1952) *Electro-osmotic stabilization of soils*, Journal of the Boston society of civil engineers, vol. 39, p. 51-83.
- COUTURE, C. (1994) *Efficacité comparative de l'électrocinétique et d'un simple lessivage pour le traitement des sols contaminés au plomb*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 204 p.
- DANA, J.D. (1957) *Dana's manual of mineralogy*, États-Unis, 16^e édition, John Wiley & sons, 530 p.
- DERMOUNE, A. (1992) *Étude en laboratoire de l'induration des argiles de la Mer de Champlain par électrocinétique*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 147 p.
- ÉTHIER, Y.A. (1993) *Migration du plomb dans une argile par électrocinétique*, Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, 139 p.
- EVANS, L.J. (1989) *Chemistry of metal retention by soils*, Environmental science and technology, vol. 23, no. 9, p. 1046-1056.
- FARRAH, H., PICKERING, W.F. (1977) *Influence of clay-solute interactions on aqueous heavy metal ion levels*, Water, air, and soil pollution, 8, p. 189-197.
- GADDE, R.R., LAITINEN, H.A. (1974) *Studies of heavy metal adsorption by hydrous iron and manganese oxydes*, Analytical chemistry, vol. 46, no. 13, p. 2022-2026.
- GERMAIN, M.D., TASSÉ, N., BERGERON, M. (1993) *The limit to self-neutralization in acid mine tailings: the case of East-Sullivan, Québec, Canada*, article soumis à l'American Chemical Society, conférence intitulée: «The environmental geochemistry of sulfide oxidation», 15 p.

- GOUVERNEMENT DU CANADA (1994) *Le chrome et ses composés, Loi canadienne sur la protection de l'environnement*, vol. 40, 65 p.
- GRAY, D.H., MITCHELL, J.K. (1967) *Fundamental aspects of electro-osmosis in soils*, Journal of the soil mechanics and foundations division (ASCE), vol. 93, no. SM6, p. 209-236.
- HAHNE, H.C.H., KROONTJE, W. (1973) *Significance of pH and chloride concentration on behavior of heavy metal pollutants: mercury(II), cadmium(II), zinc(II), and lead(II)*, Journal Environ. Quality, vol. 2, no. 4, p. 444-450.
- HARRIS, D.C. (1991) *Quantitative chemical analysis*, États-Unis, 3^e édition, W.H. Freeman and company, 782 p.
- HARTER, R.D. (1983) *Effect of soil pH on adsorption of lead, copper, zinc, and nickel*, Soil science society of america journal, vol. 47, p. 47-51.
- HOLTZ, R.D., KOVACS, W.D. (1981) *An introduction to geotechnical engineering*, États-Unis, Prentice-Hall, Inc., 733 p.
- KALBASI, M., RACZ, G.J., LEWEN-RUDGERS, L.A. (1978) *Reaction products and solubility of applied zinc compounds in some Manitoba soils*, Soil science, vol. 25, no. 1, p. 55-64.
- LAGEMAN, R., POOL, W., SEFFINGA, G.A. (1989) *Electro-reclamation: theory and practice*, Chemistry and industry, no. 18, p. 585-590.
- LEFEBVRE, G., COUTURE, C., PAVATE, T.V. (1993) *Efficacité comparative de l'électro-osmose et d'un simple lessivage pour le traitement de sables silteux naturels contaminés au plomb*, Conférence conjointe de la SCGC-ASCE sur le génie environnemental, p. 1419-1426.
- LIDE, D. R. (1992) *CRC handbook of chemistry and physics*, Boca Raton (États-Unis), 73^e édition, CRC press, pagination multiple.
- MEF (1994) *Politique de réhabilitation des terrains contaminés*, 52 p.
- MITCHELL, J. K. (1976) *Fundamentals of soil behavior*, New-York, John Wiley and sons, 422 p.
- MOHLER, J. B. (1969) *Electroplating and related processes*, New-York, Chemical publishing co., 311 p.
- PARKS, G.A. (1966) *Aqueous surface chemistry of oxides and complex oxide minerals*, Equilibrium concepts in natural water systems, Stumm, p. 121-160.
- PULS, R.W., CLARK, D.A., PAUL, C., VARDY, J. (1994) *Transport and transformation of hexavalent chromium through soils and into ground water*, Journal of soil contamination, vol. 3, no. 2, p. 203-224.

- RAUB, E., MÜLLER, K. (1967) *Fundamentals of metal deposition*, Amsterdam, Elsevier publishing company, 268 p.
- ROSS, D.S., SJOGREN, R.E., BARTLETT, R.J. (1981) *Behavior of chromium in soils: IV. Toxicity to microorganisms*, Journal of environmental quality, vol. 10, no. 2, p. 145-148.
- SHACKELFORD, C.D., DANIEL, D.E. (1991) *Diffusion in saturated soil I: Background*, Journal of geotechnical engineering (ASCE), vol. 117, no. 3, p. 467-483.
- SMITH, R.W., JENNE, E.A. (1991) *Recalculation, evaluation, and prediction of surface complexation constants for metal adsorption on iron and manganese oxides*, Environmental science and technology, vol. 25, no. 3, p. 525-530.
- STURGES, S.G., McBETH, P., PRATT, R.C. (1992) *Performance of soil flushing and groundwater extraction at the United Chrome Superfund site*, Journal of hazardous materials, vol. 29, no. 1, p. 59-78.
- UDO, E.J., BOHN, H.L., TUCKER, T.C. (1970) *Zinc adsorption by calcareous soils*, Soil science society of america proc., vol.34, p. 405-407.
- YONG, R.N., GALVEZ-CLOUTIER, R., PHADUNGCHWIT, Y. (1993) *Selective sequential extraction analysis of heavy-metal retention in soil*, Revue canadienne de géotechnique, vol. 30, no. 5, Canada, p. 834-847.
- YONG, R.N., MOHAMED, A.M.O., WARKENTIN, B.P. (1992) *Principles of contaminant transport in soils*, Amsterdam, Elsevier, 327 p.